

Analyse des flux de biomasse et des transferts de la fertilité à l'échelle du territoire villageois en Afrique sub-sahélienne: opportunités d'intégration fonctionnelle agriculture - élevage.

THESE

Pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Présentée par

Tidiane Diarisso

Charles Bielders	Professeur, Université Catholique de Louvain la Neuve	Rapporteur
Jean-Francois Tourrand	Doctorat d'état, CIRAD	Rapporteur
Charles-Henri Moulin	INRA -Supagro	Examineur
Nadine Andrieu	Ingénieur de recherche, CIRAD	Examineur
Bernard Vanlauwe	IITA, Kenya	Examineur
Patrice Djamen	ACT, Burkina Faso	invité
Marc Corbeels	Ingénieur de recherche, CIRAD	Co-Directeur de thèse
Pablo Titttonell	Professeur, Université de Wageningen, Chercheur CIRAD	Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je remercie l'ONG ACT (Africain conservation tillage initiative) à travers son projet ABACO (Agro-ecology based aggradation conservation agriculture) qui a m'octroyer la bourse de thèse.

Je remercie, le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) pour son appui financier à travers les « appuis doctorants », technique et scientifique durant toute la durée de la thèse.

Je remercie l'unité de recherche AIDA (agro-écologie et intensification durable des cultures annuelles), le bureau de l'ONG ACT pour l'Afrique Centrale et l'Afrique de l'Ouest et le CIRDES (centre internationale de recherche sur l'élevage en zone subhumide) pour leurs appuis administratifs, techniques et scientifiques, qui ont facilité la bonne l'exécution de la thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance à Mon Directeur de thèse Pablo Tittonell, qui malgré ses multiples occupations m'a fait l'honneur de conduire mes travaux avec clairvoyance et bienveillance. Il m'a fait bénéficier de ses qualités d'homme de science et de ses qualités humaines que j'ai beaucoup appréciées. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse toute ma reconnaissance à l'encadrement de la thèse : Pablo Tittonell, Marc Corbeels, Nadine Andrieu et Patrice Nana Djamen, qui ont bien voulu accepter de prendre la responsabilité scientifique et pédagogique des recherches et m'accorder toute la confiance. Ils n'ont ménagé aucun effort pour la bonne réalisation des travaux de recherche. Leurs appuis, leurs écoutes et leurs conseils ont été très précieux durant toute la durée de la thèse.

Mes remerciements vont également à Christophe le Page, François Bousquet et tous leurs collègues de l'unité de recherche Green pour leurs appuis techniques inestimables et leurs convivialités durant toute la phase de modélisation.

Lors de mes séjours à Montpellier et au Burkina Faso, j'ai fais la connaissance de plusieurs personnes dont j'ai apprécié la compagnie et les conseils, très utiles tout le long de la thèse. Je pense particulièrement à Florent Maraux, Eric Scopel, Pascal Clouvel, Pierre Martin, Krishna Naudin, Pierre Silvie, Aude Ripoche, Francois Affolder, Sandrine Auzoux, Jacques Imbernon, Patrick Dugue, Jean Marie Douzet, Rabah Lahmar, Eric Vall, Ibra Toure, Michel Havard, Karim Traore. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

J'adresse un merci particulier aux personnels d'appui de l'unité de recherche AIDA du CIRAD, et du bureau de l'ONG ACT pour l'Afrique Centrale et l'Afrique de l'Ouest, particulièrement à Brigitte Giudicelli, Jocelyne Sallin, Anne-Laure FRUTEAU DE LACLOS et Judith Parate Koudougou. Leurs disponibilités et leurs collaborations sans limites ont largement contribué à la réalisation de cette thèse.

Mes pensées vont à mes amis de Montpellier et du Burkina Faso, Lionel Yemadje, Guillaume Bruelle, Romain Loison, Charlotte POEYDEBAT, Salif Derra, Aristide Sempore, Kalifa Coulibaly, Mahamadou Diallo, Akoudjim Massouroudini, Der Dabire, Médina Karambiri, Etienne Sankina. Ils m'ont rendu les séjours très agréables.

Mes pensées vont également à mes amis et à mes collègues du Mali, Alassane Ba, Bouba Sidi Traoré, Mamy Soumaré, Abdoulaye Nientao, Bourame Koné, Zenebou Drame, Naman Keita, Youssouf Cissé, Amadou Samaké, Sadio Manda Keita, Lamissa Diakité, Alpha O. kergna, Ibrahim Cissé, Boureima Ongoiba (le "karamoko"). Leurs précieux conseils et divers appuis m'ont été très utiles lors de la phase de finalisation de ma thèse.

Grand merci aux producteurs des villages de Koumbia et de Yilou, et à mes guides, Sekou Bonigni, Bruno K Ouedraogo et Quentin Sawadogo, pour leurs accueils et leurs disponibilités.

ABSTRACT

In west Africa agro-pastoral systems, crop residues available on fields inside village territory constitute the main organic fertilizer to maintain farm soil productivities. Access to them is governed by traditional rules which authorize crop residues consumption by village and transhumant livestock. Organic fertilizer agreements between without livestock farmers and livestock owner farmers enable manure deposition on fields in exchange of crop residues. These rules and agreements involve biomass flows and soil fertility transfers between farms inside village territory. Rapid demographic growths observed in West Africa accompanied with animal traction development has led to an increasing of cultivated area, animal numbers and raised saturation of agricultural lands. Likewise, disappearance of organic fertilizer agreements between farms resulted in an accumulation of fertility on fields of livestock owner farmers to the detriment of without livestock farmers. The objective of this thesis was to explore scenarios of nutrient flows changing at village territory scale on agro-pastoral systems functioning and soil productivity in order to contribute to agro-pastoral resources management framework elaboration. We built four farm types based on their endowment resources (animal number, labor, equipment, etc.) and production objectives. We selected three farms per farm type (12 farms in total) for which we (i) quantified all the organic and inorganic resource flows at three levels: the farm, the subsystems of the farm, and the fields of the farm and (ii) assessed nutrient use efficiency and nutrient budgets. We built a multi-agent model to take into account biomass and nutrients transfers between farm types. We explored effects of (i) climatic change (declining of rainfall at 25% compared to that observed in the study area) and of (ii) introduction of 10% or 30% of conservation agriculture on maize grain and organic fertilizer productions of farm types. Subsistence oriented farm (SO), Market oriented farm (MO), Agro-pastoralist farm (AE) and Pastoralist (EA) were the four farm types identified. The last two farm types collect at least 50% of their crop residue, they retain as feed stock, against 30% for the other farm types. Animals of farm types AE and EA, also consume 90% of the residues remaining on their plots before consuming them on the plots of other farm types. The cattle manure available in the village is mainly used to fertilize the fields of farm types, AE and EA. The latter often have positive nutrient balances. Average yields of the main crops and agronomic efficiency of the average nitrogen observed were much lower, and large differences were found between the types of farms. Conversion of 30% of cropland in conservation agriculture has a negative result on the maize grain production at village territory, but positive at farm level for farm types SO and MO.

In climatic scenario, farm types, pastoralist and agro-pastoralist generally suffer the biggest declining of maize grain and organic fertilizer productions than other farm types. Improving internal nutrients management through better recycling of biomass, and more efficient use of fertilizers is the first option available for low resources endowment farms types.

Keywords: agro-pastoralism, communal grazing, crop-livestock farming, crop residues nutrient balances, resource flows, Nutrient use efficiency, West Africa

RÉSUMÉ

Dans les systèmes agropastoraux d'Afrique de l'ouest les résidus de récolte disponibles sur les parcelles récoltées au sein des territoires villageois constituent une source capitale de fertilisants organiques pour l'entretien de la productivité des sols des exploitations agricoles. Leur accès est régi par les règles de vaines pâtures instaurées par les autorités traditionnelles qui autorisent la consommation des résidus de récolte par les troupeaux du village et ceux des troupeaux transhumants. Des contrats de fumure entre producteurs sans troupeaux et producteurs détenteurs de troupeaux permettent ainsi des restitutions de fumure sur les parcelles des premiers en échange de résidus. Ces règles et contrats se traduisent par des flux de biomasses (résidus de récolte et fumure organique) et des transferts de fertilité des sols entre exploitations agricoles au sein du territoire villageois. La croissance démographique rapide observée en Afrique de l'Ouest accompagnée du développement de la traction animale a conduit à une augmentation des surfaces cultivées, des effectifs animaux et à une saturation de l'espace agricole. La disparition associée des contrats de fumure entre les exploitations s'est traduite par une accumulation de fertilité sur les parcelles des producteurs détenteurs de troupeaux au détriment de ceux sans troupeaux. L'objectif de cette thèse est d'explorer différents scénarios de changements de flux de nutriments à l'échelle du territoire villageois sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux et la productivité du sol afin de contribuer à l'élaboration de cadres de gestion des ressources agropastorales (résidus de récolte et herbes de pâturage). On a construit quatre types d'exploitation sur la base de leurs capacités de production (nombre d'animaux, main d'œuvre, équipement, etc.) et des objectifs de production. On a choisi trois exploitations par type (12 exploitations au total par village) pour lesquelles on : i) a quantifié tous les flux de ressources organiques et inorganiques à trois niveaux : l'exploitation, les sous-systèmes de l'exploitation, et les parcelles de l'exploitation ; et ii) évalué l'efficacité de l'utilisation des nutriments et réaliser les bilans en nutriments. Un modèle multi-agents a été développé prenant en compte les transferts de biomasses et des nutriments entre les différentes exploitations agricoles. Les effets de changements climatiques (baisse de 25 % de la pluviométrie par rapport à celle observée dans la zone d'étude) et de l'introduction de 10 % ou 30 % de l'agriculture de conservation sur la production de grain de maïs et la fumure organique chez les exploitations agricoles ont été explorés. Quatre types d'exploitation ont été identifiés : producteur d'agriculture de subsistance (SO), producteur intégré au marché (MO), l'agriculteur –éleveur (AE) et l'éleveur – agriculteur (EA).

Les deux derniers types d'exploitation collectent au moins 50 % de leurs résidus de récolte qu'ils conservent comme stock fourrager, contre 30 % pour les autres types. Les animaux des types, AE et EA consomment aussi 90 % des résidus restant sur leurs parcelles avant de consommer ceux sur les parcelles des autres types d'exploitation. Le fumier de bovins disponibles dans le village est principalement utilisé pour fertiliser les champs des types d'exploitation, AE et EA. Ces dernières présentent souvent des bilans en nutriments positifs. Les rendements moyens de cultures principales et l'efficacité agronomique de l'azote moyen observé étaient beaucoup plus faibles, et de larges écarts ont été révélés entre les types d'exploitations.

La conversion de 30 % de superficie cultivable en agriculture de conservation a un résultat négatif sur la production en grain de maïs à l'échelle du territoire villageois mais positif à l'échelle de l'exploitation pour les types SO et MO. Dans le scénario climatique, les types éleveur – agriculteur et agriculteur -éleveur subissent de manière générale les plus grandes baisses de productions en grain et en fumure organique que les autres types. L'amélioration de la gestion interne de nutriments grâce à un meilleur recyclage des biomasses, et l'utilisation plus efficace des engrais disponible est la première option pour les exploitations à faible facultés en ressources de production.

Mots-clés : Agro-pastoralisme, Pâturage communal, Agriculture-élevage, résidus de cultures, Bilans d'éléments nutritifs, Flux de ressources, Efficacité d'utilisation des nutriments, Afrique de l'Ouest

Table des matières

Remerciements	iii
Abstract	vi
Résumé	viii
Chapitre 1 : Introduction générale.....	1
1. Contraintes de l'entretien de la productivité des sols des exploitations agricoles d'Afrique de l'Ouest.....	2
2. Systèmes multi-agents pour explorer les options d'amélioration de la productivité des sols.....	3
3. Objectif de la thèse	4
4. Approche méthodologique générale	5
5. Plan de la thèse	7
Chapitre 2: Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso	9
1. Introduction	11
2. Materials and methods.....	12
2.1 Description of the study site and farming systems	12
2.2 Farm surveys and farm typology	13
2.3 Quantification of resource flows at farm, farm sub-system and field level.....	15
2.4 Grain and crop residue production at field, farm and village levels	16
2.5 Measurement of the herbaceous aboveground net primary production in rangelands	17
2.6 Estimation of total animal numbers and feeding requirements.....	18
2.7 Partial nutrient balances at farm, farm subsystem and field level	18
3. Results	20
3.1 Farm typology	20
3.2 Feed resources throughout the year	22
3.3 Resource flows	26
3.4 Nutrient balances	30
4. Discussion.....	34
4.1 Farm typology	34
4.2 Availability of feed resources	35
4.3 Resource flows and nutrient balances	37
4.4 Role of livestock	38
5. Conclusions	39
Chapitre 3: Soil variability and crop yield gaps in village landscapes of Burkina Faso	40
1. Introduction	42
2. Materials and methods.....	43
2.1 Site characterization.....	43
2.2 Farm and field surveys	46
2.3 Soil sampling and analyses	48
2.4 Calculations and data analysis	48
3. Results	49
3.1 Crop yield variability across the landscape and farm types.....	49
3.2 Diversity of nutrient inputs across farm types and the landscape.....	52
	xi

3.3 Soil variability.....	57
3.4 Yield gaps and resource use efficiency.....	60
4. Discussion and conclusions.....	62
Chapitre 4: Exploration des scénarios d'intégration de l'agriculture et de l'élevage sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux et la productivité des sols dans le territoire villageois	67
1. Introduction	68
2. Matériels et méthode	69
2.1 Description de la zone d'étude.....	69
2.2 Collecte de données et typologie des exploitations	70
2.3 Processus de développement du modèle multi-agent	71
2.4 Simulation avec le modèle MASTeR	74
3. Résultats.....	75
3.1 Description du modèle mutli-agent.....	75
3.2 Résultats des simulations	83
4. Discussions et conclusion.....	90
4.1 Les performances du modèle	90
4.2 Effets de scénarios, climatique et d'innovation technique sur la production en grain, en paille et en fumure organique animale	90
4.3 Effets de scénarios, climatique et d'innovation technique sur la fertilité de sol.....	91
4.4 Futur développement du modèle.....	92
Chapitre 5 : Discussion générale.....	94
1. Introduction	95
2. Les différentes stratégies de gestion de résidus de récolte déterminées par la diversité socio-économique des exploitations agricoles conduisent-elles à des flux et des bilans en nutriments différenciés ?.....	96
3. Les flux et les bilans en nutriments (déterminés par la diversité socio-économique des exploitations agricoles) expliquent-elle la variabilité de la fertilité de sol, les écarts rendements et les efficacités de l'utilisation des nutriments ?	98
4. Le modèle multi-agent permet-il d'analyser les effets d'une baisse de la production de biomasse à l'échelle du territoire villageois et de l'exploitation agricole ?	100
5. Force et faiblesse de la démarche et possibilités futures de recherche.....	102
Références bibliographiques	104
Annexes.....	115

LISTE DES TABLES

Table 1: Main characteristics of the four farm types identified in Koumbia, Burkina Faso (mean values and standard deviations).....	21
Table 2: Livestock number and grazing areas in the village of Koumbia, Burkina Faso.	24
Table 3: Rangeland production during the rainy saeson (June-September 2012, rainfall 887 mm) in the village of Koumbia, Burkina Faso (mean values and standard devations).....	24
Table 5: Fodder availability and requirements during the different seasons at village level in Koumbia, Burkina Faso (ton dry matter).	24
Table 4: Availability of feed resources (in kg dry matter per farm) during the dry season for the different farm types at Koumbia, Burkina Faso (mean values and standard deviations)...	25
Table 6: Partial nutrient balances of farms (kg farm ⁻¹) in Koumbia, Burkina Faso.....	30
Table 7: Partial nutrients balance of farm subsystems (kg sub-system ⁻¹) in Koumbia, Burkina Faso.	32
Table 8: Partial nutrient balances at field level (kg ha ⁻¹) for the different farm types in Koumbia, Burkina Faso.....	33
Table 9: Main characteristics of the two study sites	45
Table 10: Diversity of farm types (T1 to T4) in the two villages and their main structural and socioeconomic characteristics (averages followed by standard deviations)	47
Table 11: Categorisation of the sampled agricultural fields in the two villages on the basis of their distance to the homesteads.....	50
Table 12: Average yields (kg ha ⁻¹) of the main crops per farm type at both villages during the 2012 season	52
Table 13 : Average nutrient input (kg ha ⁻¹) in the form of mineral and organic fertilisers to maize, sorghum and cotton per farm type and per case study village.....	53
Table 14: Average values of soil fertility indicators per landscape unit at Yilou and Koumbia.	59
Table 15 : Principaux caractéristiques du site d'étude.....	70
Table 16: Diversité des types d'exploitations (T1 à T4) à Koumbia et leurs principales caractéristiques socio-économiques (moyennes et écarts types).....	71
Table 17 : Paramètres initiaux pour les quatre types de producteurs.....	79
Table 18 : Valeur des paramètres de la culture du maïs.....	79
Table 19 : Estimations des producteurs sur l'effet des scénarios, climatique et d'innovation technique	83
Table 20 : Tendances de données issues de l'enquête de terrain et de celles simulées avec le modèle MASTeR (Scénario de référence) pour les quatre types d'exploitation agricoles	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Structure de la thèse indiquant les liens entre les chapitres et les hypothèses respectives	7
Figure 2 : Map of spatial organisation and land use in the village of Koumbia, Burkina Faso.	14
Figure 3 : A typical farm system diagram showing the subsystems inside a farm and the resource flows between subsystems.	19
Figure 4: Principal component analysis of the farm characteristics of 53 randomly selected farms in Koumbia showing the projection of the compound replicates on the plane of the first and second principal components. 'CashCropArea' is the land area of a farm cropped with cotton; 'farmArea', the total land area of a farm; 'labor', the family labour forces on a farm; 'Equipment', the sum of the number of ploughs, seeders and carts owned by a farm and 'Cattle' the number of cattle on a farm expressed in TLU.	21
Figure 5: Annual incoming and outgoing resource flows at farm level shown for the four farm types that were identified in the village of Koumbia, Burkina Faso.....	29
Figure 6: Approximate topographic profiles and schematised soil toposequences in the two village territories, indicating local soil names and the average altitude at the highest and lowest landscape positions.	45
Figure 7: Yields of the major crops cultivated in Yilou and Koumbia villages during 2012 season as a function of the distance from the fields to the homestead (Top) and of the area of each individual field (Bottom). Note that the scale of the axes depicting yields, distance to homestead and field area is different at both sites. The dot-dashed line represents approximately the maximum size of fields that are ploughed by hand. Larger fields are predominantly ploughed using animal traction.	51
Figure 8: Application rates of organic and mineral fertilizers, and the respective application rates of organically-held and mineral C, N, P and K at increasing distance from the homesteads in Yilou (n = 63) and Koumbia (n = 60) villages.	55
Figure 9: Partial nutrient balances at field scale at Yilou (n = 63) and Koumbia (n = 60) villages. Left: N, P and K inputs versus their respective outputs in crop harvests (including harvesting of crop residues). Dotted lines indicate one to one, two to one and half to one ratios. Right: N, P and K balances (inputs – outputs) as a function of the distance from the centre of each field to the homesteads.	56
Figure 10: Variation in average soil organic carbon (A), available phosphorus (B), soil pH (C) and sum of exchangeable bases (D) in the topsoil (0-20 cm) of fields located at increasing distance from the homesteads at Yilou (black circles) and Koumbia (white circles).	57
Figure 11: Relationships between grain yield and applied N (A, B), between responses to N fertilizer and soil organic carbon (C, D) and between N use efficiency and grain yield (E, F) for sorghum and maize respectively grown on farmers' fields in Yilou and Koumbia. For explanations see text.....	61
Figure 12 : Diagramme de classe du système de production du village de Koumbia.....	74
Figure 13 : Productions de grain de maïs (A) et de la fumure organique animale (B) avec les scénarios, climatique et d'innovation technique à l'échelle du territoire villageois	85

Figure 14 : Evolution de la fertilité de sol dans les scénarios, climatique et le scénario d'innovation technique à l'échelle du territoire villageois	86
Figure 15 : Production de grain de maïs par type d'exploitation agricoles avec les scénarios, climatique et d'innovation technique	87
Figure 16 : Production de fumure organique animale par les types d'exploitation agricoles avec les scénarios, climatique et d'innovation technique.....	88
Figure 17 : Evolution de la fertilité de sol chez les types d'exploitation agricoles avec les scénarios, climatique et d'innovation technique	89

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. CONTRAINTES DE L'ENTRETIEN DE LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS DES EXPLOITATIONS AGRICOLES D'AFRIQUE DE L'OUEST

Dans les systèmes agropastoraux d'Afrique de l'ouest les résidus de récolte disponibles sur les parcelles récoltées au sein des territoires villageois constituent une source capitale de fertilisants organiques pour l'entretien de la productivité des sols des exploitations agricoles (Bationo, 1991).

Leur accès est régi par les règles de vaines pâtures instaurées par les autorités traditionnelles qui autorisent la consommation des résidus de récolte par les troupeaux du village et ceux des troupeaux transhumants. Des contrats de fumure entre producteurs pauvres sans troupeaux et producteurs riches détenteurs de troupeaux permettent ainsi des restitutions de fumure sur les parcelles des premiers en échange de résidus. Ces règles et contrats se traduisent par des flux de biomasses (résidus de récolte et fumure organique) et des transferts de fertilité des sols entre exploitations agricoles au sein du territoire villageois (Rufino et al., 2011a).

La croissance démographique rapide observée en Afrique de l'Ouest accompagnée du développement de la traction animale a conduit à une augmentation des surfaces cultivées, des effectifs animaux et à une saturation de l'espace agricole (Bremen et Debrah, 2003 ; Dugue et al., 2004 ; Powell et al., 2004). Elle s'est traduite par une réduction des surfaces de pâture, des conflits croissants pour l'accès au foncier et aux résidus de culture et une augmentation de la durée de la transhumance saisonnière hors du territoire villageois réduisant alors les restitutions de fumure pour le territoire (Vall et al, 2006). La disparition associée des contrats de fumure entre les exploitations riches, détenteurs de troupeaux et les exploitations pauvres, sans troupeaux s'est traduite par une accumulation de fertilité sur les parcelles des premiers au détriment des seconds. Comme dans d'autres zones d'Afrique subsaharienne, une baisse de productivité et des bilans négatifs en nutriments de sols sont ainsi observés chez les exploitations pauvres, sans troupeaux (Tittonell et al., 2005 ; Zingore et al., 2007). En effet compte tenu du faible taux d'application moyen de fertilisants minéraux par les exploitations (environ 8 kg.ha⁻¹ CEDEAO, 2006 ; Sanchez, 2002), les quantités de fertilisants minéraux et organiques appliquées par les producteurs ne compensent pas les exportations de nutriments par les cultures (Stoorvogel et al., 1993). Le coût élevé et soutenu de fertilisants minéraux ne laisse pas présager une inversion de cette tendance.

En outre l'augmentation prévue de la variabilité climatique (IPCC, 2012) est susceptible d'accentuer la baisse observée de la productivité des sols (Reij, C., Tappan, 2005, Traore et al., 2013).

Des solutions adaptées permettant aux producteurs d'améliorer la productivité des sols par la mobilisation des résidus de récolte, la fumure organique et minérale doivent être explorées. Une importante littérature a décrit les transferts de biomasse, les bilans de nutriments et ses effets sur la fertilité des sols (Manlay et al., 2004 ; Schlecht et al., 2004 ; Autray et al., 2012) dans les territoires villageois d'Afrique de l'Ouest. Mais rares sont ces études qui ont considérés de façon explicite l'effet spécifique des différents types d'exploitation sur les flux de nutriments à l'échelle du territoire villageois et les bilans associés.

Les exploitations agricoles sont différentes du fait notamment leurs capacités de production (aire de culture, taille de la main d'œuvre, les animaux, le niveau d'équipement) et des objectifs de la production (commercialisation ou autoconsommation) (Eric Vall et al., 2006 ; Tittonell et al., 2010 ; Sanogo, et al., 2010). Ces facteurs socio –économiques déterminent pour une large part les stratégies de mobilisation des résidus de récolte et de la fumure organique disponibles au sein du territoire villageois, et leur effet sur la productivité des sols. La connaissance de ces différentes stratégies développées par les exploitations agricoles est un préalable (i) pour expliquer la variabilité de la productivité des sols et de rendements de cultures des exploitations agricoles.

2. SYSTÈMES MULTI-AGENTS POUR EXPLORER LES OPTIONS D'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS.

Explorer l'effet de changements au sein des systèmes agropastoraux sur les flux de nutriments pilotés par différents types de producteurs et la productivité des sols nécessite une analyse dynamique des interactions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire villageois. Plusieurs modèles ont été développés pour analyser l'effet de solutions techniques alternatives sur le fonctionnement des systèmes en Afrique subsaharienne (Andrieu et al., 2012 ; Tittonell et al., 2009). Ces modèles sont centrés sur le fonctionnement de l'exploitation et ne permettent pas d'analyser l'effet contrasté que peut avoir une solution à l'échelle de l'exploitation et du territoire. Les systèmes multi-agents (SMA) par contre sont mieux adaptés pour prendre en compte la dynamique des interactions à différentes échelles.

Ce sont des outils puissants permettant d'imbriquer différentes échelles pour analyser les interactions entre une diversité d'acteurs utilisant une ressource commune (Ferber, 1995 ; Bousquet & Le Page, 2004 ; Bah et al., 2003).

Des modèles SMA ont été développés et permettent de simuler notamment la dynamique de carbone à différentes échelles (parcelle, exploitation agricole et territoire villageois) (Belem et al., 2006, Belem et al., 2011). Ces modèles SMA ne simulent toutefois pas les flux de nutriments qui ont lieu entre les différentes exploitations agricoles, source de transferts de fertilité, à l'échelle de territoire villageois d'Afrique de l'Ouest. Le développement d'un modèle multi-agents tenant en compte la diversité des systèmes de production peut (i) permettre de prendre en compte les dynamiques d'évolution de système des exploitations agricoles, (ii) les transferts de fertilité des sols occasionnés par les flux de biomasses entre les différentes exploitations à l'échelle de territoire villageois, et (iii) d'évaluer des scénarios futurs basés sur la gestion durable des résidus de récolte et fumure organique.

3. OBJECTIF DE LA THÈSE

L'objectif principal de cette thèse est d'explorer différents scénarios de changements de flux de nutriments à l'échelle du territoire villageois sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux et la productivité du sol afin de contribuer à l'élaboration de cadres de gestion des ressources agropastorales (résidus de récolte et herbes de pâturage).

Les objectifs spécifiques sont de :

- caractériser la diversité des systèmes de production et les stratégies de gestion de ressources communes (fumure organique et résidus de récolte), les pratiques agropastorales et leurs impacts sur les ressources naturelles (pâturages et zones de cultures, etc.) ;
- construire un modèle multi – agents à l'échelle du territoire, permettant de représenter les relations entre types de producteurs (éleveurs sédentaires, agriculteurs et agro-éleveurs), leurs mécanismes de coordination, les concurrences et leurs conséquences sur l'utilisation des ressources agropastorales ;
- explorer des scénarios de changements à l'échelle du territoire villageois et évaluer leurs effets sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux et la productivité du sol.

Trois hypothèses sont testées :

- les différentes stratégies de gestion de résidus de récolte déterminées par la diversité des exploitations agricoles conduisent à des flux et des bilans en nutriments différenciés ;
- les flux et les bilans en nutriments (déterminées par la diversité des exploitations agricoles) expliquent la variabilité de la productivité de sols et les écarts de rendements observés entre les différentes exploitations agricoles ;
- le modèle multi-agents permet d'analyser les effets d'une baisse production de biomasse à l'échelle du territoire villageois et de l'exploitation agricole.

4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRALE

L'étude a été menée dans deux villages du Burkina Faso. Le village de Yilou situé en zone soudano-sahélienne une pluviométrie moyenne de 600 mm par an et par des systèmes de cultures dominés par le sorgho et le mil. Le village de Koumbia situé en zone soudanienne se caractérise par des conditions plus favorables à la production de biomasse avec une pluviométrie moyenne de 900 mm par an. Les systèmes de culture sont dominés par le coton et le maïs qui favorisent l'accès aux intrants par les producteurs. Les deux villages sont densément peuplés par rapport à leur capacité de charge et une forte pression agropastorale se traduisant par une compétition pour l'accès aux résidus de cultures.

La démarche méthodologique générale est axée sur trois phases complémentaires. Une première phase de recueil de données de caractérisation, une deuxième phase de développement du modèle multi agents et une troisième phase d'exploration des scénarios de changements au sein des systèmes agropastoraux et de leurs effets sur la productivité de sols des exploitations agricoles.

Phase de recueil de données

Des enquêtes collectives (focus groupe) ont été menées dans les deux villages auprès d'une quinzaine de producteurs afin de déterminer les principaux éléments du réel à modéliser (principales zones de pâturage, les principales cultures, les habitats). Des enquêtes individuelles ont été réalisées auprès de 52 et 53 exploitations agricoles de Yilou et Koumbia respectivement en vue de caractériser les exploitations agricoles et décrire les modes de gestion des ressources agropastorales.

Dans chacun de ces villages, le suivi et la quantification des flux de biomasses ont été réalisés de mars 2012 à février 2013 auprès de 12 exploitations regroupées dans 4 types (soit 3 exploitations pour un type) afin de décrire plus finement les flux de biomasses à trois niveaux d'échelle : territoire villageois, exploitation et parcelle. Des échantillons composites de sols (63 à Yilou et 60 à Koumbia) issus des parcelles des exploitations agricoles suivies ont été collectés en 2012 avant le début de la saison des pluies dans chaque village.

Les échantillons de sols ont été analysés au laboratoire d'analyse de sol du Cirad pour déterminer leurs teneurs en éléments fertilisants carbone organique du sol, l'azote total, phosphore assimilable, les bases échangeables et le pH eau.

Phase de développement des modèles

Pour chacune des 12 exploitations suivies une représentation des différents flux de biomasse a été validée avec les producteurs. Un modèle conceptuel synthétisant à l'échelle du territoire villageois les différentes représentations validées avec les producteurs a alors été développé. Les formalismes du langage UML (Unified Modeling Language) à travers le logiciel magic draw ont été utilisés (Neuendorf, 2006). Ce modèle conceptuel a été ensuite implémenté sous la plateforme de simulation Cormas (Bousquet et al., 1998).

Phase d'exploration des scénarios de changements

Les données issues des enquêtes et de la littérature ont été utilisées pour le paramétrage du modèle de simulation multi-agents. Des simulations ont été réalisées pour explorer les impacts de scénarios, climatique et d'innovation technique sur la durabilité de systèmes de production des exploitations agricoles d'Afrique de l'Ouest. Par le scénario climatique, on a analysé les tendances observées dans les territoires agro-pastoraux d'Afrique de l'Ouest (Traore, 2013 ; Boubacar, 2013). Des expérimentations des options techniques innovantes impliquant différents acteurs (la recherche, les producteurs, les autorités traditionnelles et administratives et le secteur privé) autour des plateformes d'innovation sont en cours dans les sites d'étude de la thèse. Le scénario d'innovation a été testé afin de contribuer à une analyse des impacts de l'introduction de l'agriculture de conservation dans le territoire villageois.

5. PLAN DE LA THÈSE

Cette thèse est composée de 4 chapitres. Le chapitre 1 porte sur l'analyse, la quantification des flux de biomasses et de bilans de nutriments associés en relation avec la diversité des exploitations agricoles dans les systèmes agro-pastoraux du Sud-Ouest du Burkina Faso. Le chapitre 2 montre le rôle que joue la diversité socio-économique des exploitations agricoles dans l'explication des pratiques de gestion impactant la productivité de sols et le rendement des cultures.

Le chapitre 3 explore les impacts des scénarios climatique, démographique et d'innovation technologique sur la productivité de sol et le fonctionnement des systèmes de production des exploitations agricoles. Dans le chapitre 4 (le dernier), les implications de cette thèse sont discutées.

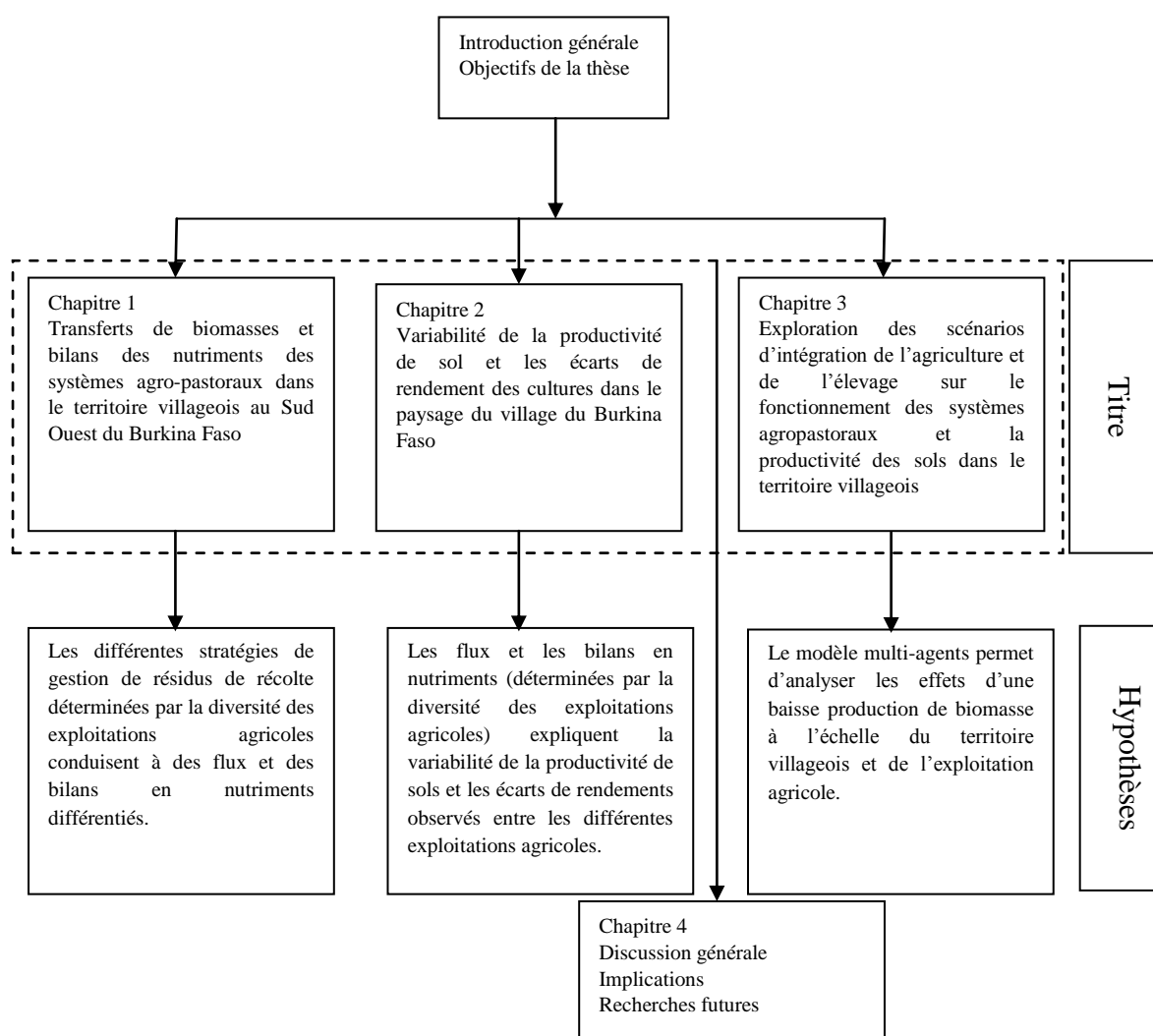


Figure 1 : Structure de la thèse indiquant les liens entre les chapitres et les hypothèses respectives

CHAPTER 2: BIOMASS TRANSFERS AND NUTRIENT BUDGETS OF THE AGRO-PASTORAL SYSTEMS IN A VILLAGE TERRITORY IN SOUTH-WESTERN BURKINA FASO¹

This Chapter is published as :

Diarisso T., Corbeels M., Andrieu N, Djamien P. and Tittone P. (2015), Biomass transfers and nutrients budgets of the agropastoral systems in a village territory in south-western of Burkina faso. Nutrient cycling in agroecosystems.

Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso

Abstract

Privatisation of grazing resources is emerging in the agro-pastoral systems of West Africa, resulting in increased pressure on the remaining communal rangelands and greater competition between farmers for access to crop residues. Differential management strategies arise as determined by household diversity. This study quantified the flows of biomass and related nutrient budgets in the agro-pastoral systems in south-western Burkina Faso (Koumbia) in relation to farm diversity. Four farm types were identified: subsistence-oriented crop farmers, market oriented crop farmers, agro-pastoralists and pastoralists. Crop farmers collect about 30% of their maize harvest residues for feeding during the dry hot season, while agro-pastoralists and pastoralists stock about 50% of their maize residues. Whilst the remaining crop residues on (agro) pastoralist farms were almost entirely grazed by their own cattle, about 90% of the crop residues of crop farmers were consumed by cattle of (agro) pastoralists. On the other hand, available manure from cattle in the village is mainly used to fertilize the fields of the livestock owners. As a result, the cropped land of farmers with few livestock is continuously mined for nutrients. Calculated partial balances of N and K at farm level were negative for all farm types, except for N in the case of pastoralist farms. N and K balances of cropped fields were generally negative on all farm types. To prevent further nutrient mining, current systems will have to shift towards more intense use of external inputs, mainly chemical fertilizers.

Keywords: agro-pastoralism, communal grazing, crop-livestock farming, crop residues nutrient balances, resource flows, West Africa

1. INTRODUCTION

West Africa has one of the highest population growth rates in the world: 2.7% per year (<http://esa.un.org/>). It is, for instance, expected that the population of Burkina Faso, 17 million people today, will reach about 41 million by 2050. Human-induced land degradation in West Africa has been a concern for a long time (Roose, 1993). A recent study in the Volta basin estimates that soil quality or related vegetation productivity is declining on as much as 65% of the land (Le et al., 2012). In addition, rainfall is predicted to become considerably more variable with increased frequency of both droughts and heavy rains, because of climate change (IPCC 2014). The increased population pressure on the natural resource base in combination with more variable rainfall is expected to cause further soil degradation, low crop productivity and frequent conflicts around the utilization of communal natural resources (Dugué et al. 2004; Reij et al 2005). Livestock densities continue to increase, and the share of the land under extensive agriculture expands at the expense of communal rangelands and woodlands (Hiernaux et al., 2009; Ouedraogo et al. 2010; Van Vliet et al. 2013). With the introduction of cotton in the 1970s sedentary farmers started to keep livestock as a means of investing their savings made through cultivation of cotton. On the other hand, the traditional nomadic pastoralists are becoming increasingly sedentary and started growing cereals for household consumption and cotton for extra cash income (Vall et al., 2006). As a consequence, a process of privatization of the agro-pastoral resources is emerging (Rovere, et al., 2005) at the expense of the traditional agro-pastoral systems characterized by transhumance from one grazing ground to another, collective use of crop residues, collective management of manure and bush fallowing (Drechsel et al. 2001; Henao and Baanante 2006). Crop residues, which were collectively used in the past, are now increasingly removed from the fields by the individual farmers and stored on their farm to feed the cattle during the dry season (Barbier et al., 2009). Collective management of manure, previously permitted by the fact that farmers entrusted their animals to pastoralists who herded them in communal areas and in harvested fields, is also disappearing.

Privatization of the agro-pastoral resources results in high pressure on the remaining communal grazing lands and increasing competition between farmers in the village for access to crop residues, accentuating social differences. It affects the availability of grazing resources and manure in the village, and the dynamics of biomass and nutrient flows between farms.

Although several studies have analysed dynamics of biomass flows between different land units of villages in West Africa (Dugué 2000; Achard and Benoit 2003; Manlay et al. 2004; Schlecht et al. 2004; Schlecht et al. 2006), few of them integrated this information with the socio-economic diversity of the households in the village (La Rovere et al., 2005 in Niger; Harris, 1998). In other parts of Africa, studies demonstrated the importance of communal agreements for the coordination of biomass flows between crop and livestock systems and between farms (e.g. Rufino et al. 2011).

A proper diagnosis of the current situation to inform innovative management requires not only a quantification of the flows of biophysical resources, but also information on diversity of management strategies as determined by household diversity.

The overall resource use efficiency at village level is to a large extent determined by grazing management (Andrieu et al. 2014), which results from a combination of factors related to the agro-ecological potential of the territory, traditional bylaws, current population pressure, land endowment and market opportunities. In the current situation, rangelands continue to subsidize farming in terms of biomass and nutrient transfers – but for how long? How does the privatization of the land and resources, such as crop residues and animal manure, affect the dynamics of biomass flows and nutrient budgets in a village territory? Do these new dynamics result in more sustainable situations?

The objective of this study was to analyse (i) current dynamics of biomass and nutrient flows in agro-pastoral systems in western Burkina Faso, and (ii) the differential management strategies as determined by household diversity.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Description of the study site and farming systems

The study was conducted from March 2012 to February 2013 in the village of Koumbia (3°41'15" W; 11°14'47" N) (Figure 2.1), situated about 15 km from Bobo-Dioulasso in south-western Burkina Faso (Tuy province). The total area of the village is 9068 ha. Cropland and communal rangeland represent respectively 62 % and 7 % of the total land area. The climate is typical for the Sudanian zone of West Africa, characterised by a mono-modal rainfall pattern with an 8-month dry season and a distinct 4-month rainy season (June-September) with a seasonal rainfall of 800 to 1100 mm, July and August being the wettest months.

The dry season is divided into two periods: a period known as ‘cold’ with an average temperature of 27°C (October - February), and a hot period (March – May) with an average temperature of 31°C. The topography of the village territory is generally flat, with some lowlands. The soils are mainly Luvisols and Lixisols (FAO World Reference Base for Soil Resources). About 800 farming households live in the village, which are belonging to three main ethnic groups: the Bwaba (35 % of the population), Mossi (54%), and Fulani (10%). Population density is close to 60 inhabitants km⁻². The Bwaba are the native land holders. Mossi immigrated in Koumbia from the northern part of Burkina Faso in 1980 (Vall et al. 2006), whilst Fulani herders had settled in hamlet areas in 1975 (Dongmo et al., 2012). Some of the Fulani have more recently left these areas, because of shortage of rangelands. Cotton and maize are the main crops in the village and cover about 90% of the cultivated area. The other crops grown are groundnut, cowpea, sesame, and, in the lowlands, rice. Cotton and maize receive chemical fertilizers purchased on the local markets or supplied on credit by the cotton company that buys the cotton production. Local organic fertilizers are also used: household waste, compost, corral manure from the own farm (i.e. for farms that own cattle), or corral manure procured through exchange agreements with other farmers. The livestock systems are based on the extensive use of rangelands that are mainly situated on the hills, the rocky areas or lowlands of the village. Cattle (zebu) and small ruminants (goats and sheep) are the main livestock in the village.

2.2 Farm surveys and farm typology

Focus group discussions and two rounds of individual farm surveys were conducted with households to collect general information and data on agricultural production activities. The focus group was composed of 15 farmers of the three ethnic groups and two local agricultural development agents, with the objective to identify general characteristics of the village, the main crops, soil types and the accessibility of rangelands and croplands for grazing. Two transect walks with five volunteers among the 17 villagers were realized in order to identify the locations of croplands, rangelands, and the residential areas in the village. Total surfaces of cropland and rangeland were calculated from satellite images of the village using the geographic information system software QGIS 2.0.1-Dufour (<http://www.qgis.org>).

The first individual farm survey was conducted on a sample of ten pastoralists with the main objective to characterise herding and feeding management throughout the three seasons of the year and to delineate the main areas of grazing in the village.

These pastoralists were randomly selected from the three hamlet areas in the village territory. During these interviews, we also selected the locations of the rangeland plots for the assessment of biomass production.

The second farm survey was conducted with a sample of 53 farms from the list of farmers that was provided by the Cotton Producer Groups in the village. The Fulani pastoralists are part of the closest (physically and/or socially) Cotton Producer Group. The selection of these farms was stratified per ward, in order to cover the entire village territory and its diversity in terms of landscape situations and ethnic groups. It has to be noticed that members of ethnic groups that arrived in different migration phases tend to be spatially concentrated. Through this farm survey a farm typology was established based on farm socio-economic and structural characteristics (total farm surface, livestock numbers, equipment, labour availability, land-labour ratio, production orientations, and off-farm activities). Principal component analysis (PCA) and ascendant hierarchical clustering methods were used to discriminate homogeneous farm types (Tittonell et al., 2010).

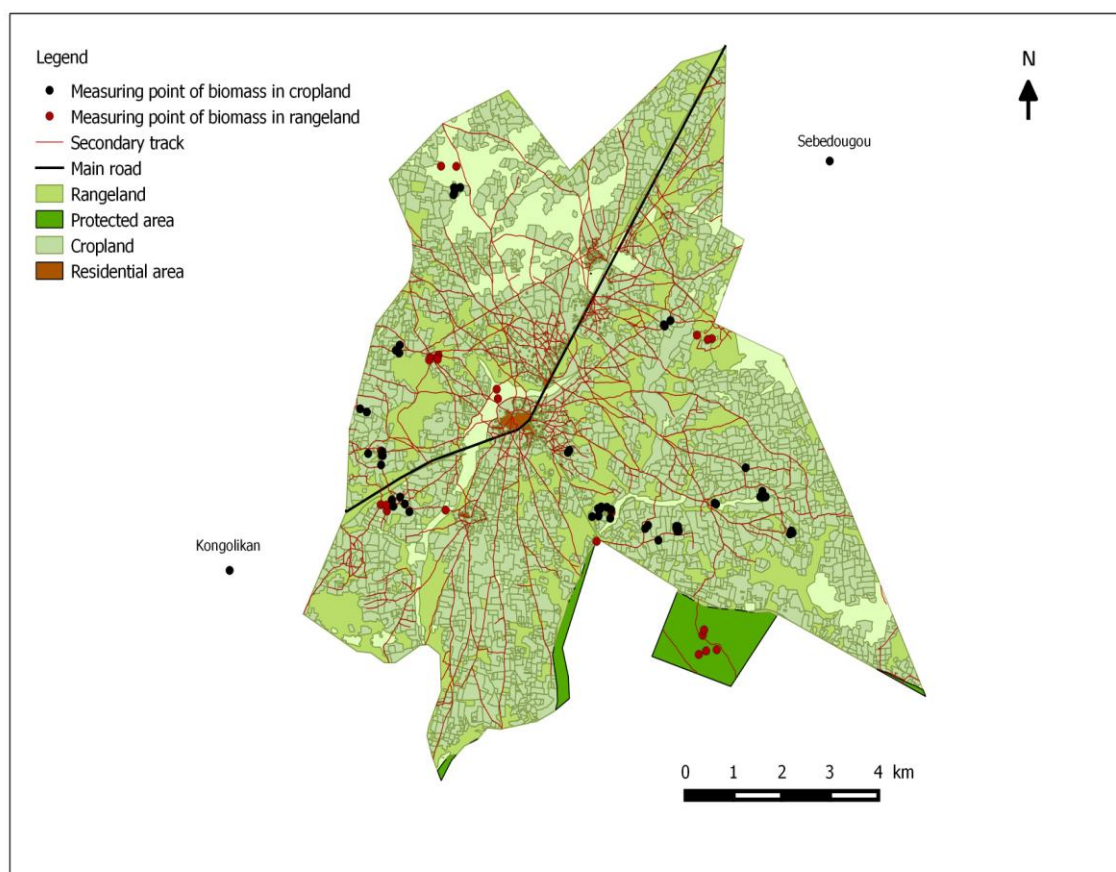


Figure 2 : Map of spatial organisation and land use in the village of Koumbia, Burkina Faso.

2.3 Quantification of resource flows at farm, farm sub-system and field level

We selected three farms per farm type (12 farms in total) for which we quantified all the organic and inorganic resource flows at three levels: the farm, the subsystems of the farm, and the fields of the farm. To do so, each farm was visited every two weeks from March 2012 to February 2013. The following resources were considered for each of the farms: cereal grain, cottonseed, milk, faeces/manure, household waste, compost, crop residues and other fodder sources, cottonseed cake, and chemical fertilizers.

At farm level, we quantified all incoming and outgoing resources of the farm. At this level, the farm was considered as a black box and internal resource flows were not taking in account. The origin of each incoming resource and the destination of each outgoing resource were identified. Typically in our study, farms consisted of three subsystems: the crop production subsystem, the livestock production subsystem and the household subsystem (Figure 2). The crop production subsystem consists of fields and crops that provide food for the household, feed for cattle and products that can be marketed. The components of the livestock subsystem are the animals, the park, milk, faeces and manure. Household is the third subsystem, a place of concentration of output and input resources of the farm and the decision centre of farm management. The household subsystem is also a place of production of household waste and compost.

At field level, we quantified amounts of applied inorganic (N-P-K and urea) and organic fertilizers (manure, household waste, compost) and outgoing crop productions. The sizes (ha) of the fields of a farm were measured using a global positioning system device. Values for the smaller fields were crosschecked with compass and tape measurements. Applied N-P-K and urea fertilizers on fields were reported by farmers in bags of 50 kg and converted in kg ha⁻¹. Flows of animal manure, household waste and compost applied by farmers were recorded in local units of measure i.e. carts, and converted to kg ha⁻¹ dry matter. For this conversion, we weighed, respectively, the amounts of household waste, compost and manure that can be loaded in the three types of carts that farmers use in the village, and took subsamples for dry matter determination. Quantity of animal feed refusals that are transferred to the compost pit were estimated based on available literature data (Autfray et al., 2012). The amounts of crop residues harvested from the fields and stored by farmers were estimated by multiplying the mean weight of three straw bundles by their total number.

In a similar way, we also estimated the amounts of velvet bean (*Mucuna pruriens*) biomass that was harvested and stored on the farms. Velvet bean was produced on some farms as it has been locally promoted by the national research centre as a fodder crop.

Deposition of animal faeces in fields was estimated using the following equation:

$$AFD = C \times N \times t$$

where AFD is animal faeces deposition (kg dry matter ha⁻¹); C, daily production of faeces by one Tropical Livestock Unit (1 TLU = 250 kg of live weight), equivalent to 2.8 kg of dry matter per day (Landais and Lhoste 1993); N, number of TLUs per ha and t, time spent by one TLU in the field (days).

2.4 Grain and crop residue production at field, farm and village levels

2.4.1 Determination of crop biomass at field level

Measurement of maize aboveground biomass and grain yield

Grain yield and maize aboveground biomass at harvest were measured on 26 fields belonging to the 12 selected farmers. We used a destructive method following the approach described by Levang and Grouzis (1980).

Three squares of 9 m² per field were randomly selected and in each square all aboveground biomass was cut, grains were separated from straw and fresh grains and straw were weighed. Subsamples were taken, oven dried at 70 °C for 24 hours and weighed to determine oven dry weights, and dry:fresh weight ratios were applied to all fresh samples to obtain dry biomass.

Estimation of aboveground biomass and grain yield of other crops

Grain yields of sorghum, cowpea, and rice were estimated by collecting samples from measured areas in the fields of the 12 selected farms. The samples were air-dried, weighed and converted to kg ha⁻¹. Based on the grain yields, straw yields were estimated using average crop-specific harvest indexes established by Defoer et al. (1998) for the region.

These were 0.42, 0.31, 0.40 and 0.34 for maize, sorghum, rice and cowpea, respectively. For cotton, we used the yield values recorded by the cotton company on the different farms.

2.4.2 Determination of crop biomass at farm level

Crop biomass production

Average grain and biomass crop yields per ha for each farm type were established with the field data and multiplied by the average field surfaces per farm type to assess the total productions of grain and straw by type of farm.

Estimation of straw left on field per farm type

The amount of crop residues left on fields for each farm type was estimated by the difference between the average straw yields of the farm and the records on the amount of crop residues harvested from the fields and stored (or sold) on the farm. This was done per crop type.

2.4.3 Crop residues at village level

The total production of crop residues, the amount of crop residues left on fields, and the amount of stored crop residues, in the entire village were estimated based on the respective average values per farm type, and the estimated number of farms for each farm type in the village.

2.5 Measurement of the herbaceous aboveground net primary production in rangelands

Herbaceous aboveground net primary production was determined in September 2012 on the four types of rangeland that were identified in the village territory during the farm surveys with the 10 Fulani pastoralists. The rangeland types were differentiated by their location: on the hills, in the rocky area, on fallow land and in the lowlands of the village. We selected 28 plots of 1.3 m² that were protected from grazing with barbed wire from the start of June to the end of September, i.e. during the growing season. The plots selected were as follows: 11 plots in the hills, 6 in the rocky area, 5 on fallow land, and 6 in the lowlands. Dry herbaceous net primary production was determined on 1 m² quadrats using the destructive method for measurement of aboveground biomass as described above. The total surfaces of rangeland on the hills, in the rocky areas, on fallow land and in the lowlands of the village were calculated from satellite images (Pléiades system, National Centre for Space Studies, France).

Values of aboveground net primary production in dry matter per hectare from the plots and total surfaces for each type of rangeland were used to estimate the total herbaceous net primary production from rangelands at village level.

2.6 Estimation of total animal numbers and feeding requirements

On each of the selected farms the number of animals (cattle, sheep and goats) was recorded and converted in TLU. Total TLU in the village was estimated from the average number of animals on each farm type and the estimated number of farms for each farm type in the village. The total feeding requirement (kg dry matter) at village level was calculated from the total number of animals (in TLU) considering a daily dry matter consumption of one TLU equivalent to 6.25 kg dry matter per day (Landais and Lhoste, 1993).

2.7 Partial nutrient balances at farm, farm subsystem and field level

We calculated partial balances of N, P and K at field, farm subsystem (crop subsystem, livestock subsystem and household subsystem) and farm level for the four farm types according to the approach used by Zingore et al., (2007). At field level, nutrient balances (kg ha⁻¹) were calculated by subtracting total nutrient inputs from applied manure (chemical fertilizer, compost, household waste or animal dejections from the total nutrient outputs in the form of harvested crops and crop residues.

Observations and monitoring was done on a field-by-field basis. The results of fields from the same farm were combined at the crop production subsystem and farm levels.

Not measured were biological N fixation, sedimentation and deposition, N leaching, gaseous losses and erosion, as they were considered beyond the scope of the study: inputs and outputs measured were those that farmers can see and manipulate. Nutrient balances at crop, livestock and household subsystem level were calculated according the resource flow diagram presented in Figure 2.2. At farm level, nutrient balances were calculated for the 12 selected farms by subtracting the total nutrients from all outgoing resource flows from the total nutrients from all incoming resource flows. Grasses and crop residues grazed by cattle were not considered as inputs in the livestock subsystem or farm. The incoming and outgoing dry matter resource flows were converted to N, P and K contents using values for nutrient concentrations of the different resources from existing literature data (see Appendix, Table S1).

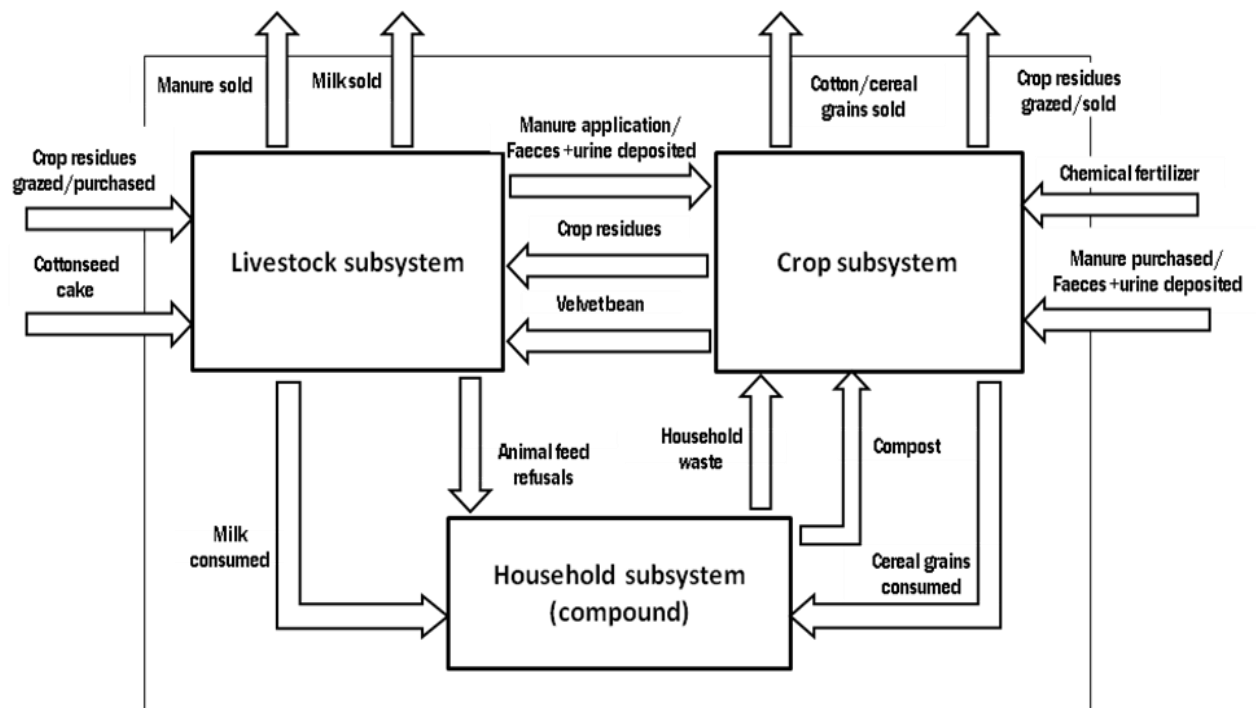


Figure 3 : A typical farm system diagram showing the subsystems inside a farm and the resource flows between subsystems.

3. RESULTS

3.1 Farm typology

Following the PCA and ascendant hierarchical clustering, we identified four farm types in the village of Koumbia (Table 1, Figure 3): subsistence-oriented crop farmers, market oriented crop farmers, agro-pastoralists, and pastoralists. The PCA revealed that more than 75% of the variability in farms was explained by the first two principal components: PC1 (50%) and PC2 (26%). The PC1 was strongly related to the total farm area, the area under cash crops (cotton) and labour availability of the household. PC2 was related to cattle numbers. The subsistence-oriented farm type represented the highest proportion (44 %) in our random sample of 53 farms. This type of farms had low resource endowments with equivalent areas of maize and cotton production. Maize grain production was exclusively used for own consumption. The total area of these farms was about 4.5 ha and the number of animals was about 4 TLUs. Off-farm activities (masonry and trading activities) were an important activity for this farm type, representing on average 15% of the household activities. The market oriented farm type had medium resource endowments (10.2 ha of land and almost 7 TLUs) with a relatively large proportion (58%) of the area cropped under cotton (5.9 ha).

They sold part of the maize grain production on local markets. Market oriented farms represented 26% of the farms in our sample. Agro-pastoralist farms (17%) had a significant number of livestock (17 TLUs), but crop production was relatively important (on average 7.8 ha of land of which about 4.5 ha under cotton and 3.1 ha under maize). This type of farmers were previously crop farmers, but who built up a relatively large herd of cattle.

The fourth type of farmers represented Fulani pastoralists, comprising 13% of the sampled farms. They were owners of a large number of livestock (on average 58 TLUs). In the past, these farmers were nomadic, but they became sedentary in recent decades and began growing crops (on average about 3 ha of maize and 1.6 ha of cotton). Livestock production was clearly the main activity for this group of farmers. Together with the agro-pastoralists, they were the largest households in terms of family labour (on average, respectively 12 and 13 labour forces).

Table 1: Main characteristics of the four farm types identified in Koumbia, Burkina Faso (mean values and standard deviations).

Farm group	Proportion (%)	Family size	Total area (ha)	Family labour	TLU*	Equipment#	Cotton area (ha)	Maize are (ha)	Off-farm activities (%)
Subsistence-oriented crop farmers	44	6 ±3.2	4.5±2.5	4.5±2.6	4.3±3.5	2±0.6	1.8±1.6	2.4±1.5	15±15
Market-oriented crop farmers	26	9±2.5	10.2±2.6	7.0±1.1	6.7±1.7	3±1.0	5.9±1.5	3.7±1.6	8±10
Agro-pastoralists	17	21±7.5	7.8±2.6	12.0± 5.1	17.2±3.5	3±0.6	4.5±0.9	3.1±1.6	10±9
Pastoralists	13	23±6.1	6.9±3.5	13.0± 4.0	58.0±13.7	2±1.1	1.6±1.5	3.1±2.9	12±10

*TLU: tropical livestock unit

#Equipment is defined as the sum of the number of ploughs, seeders and carts owned by a farm

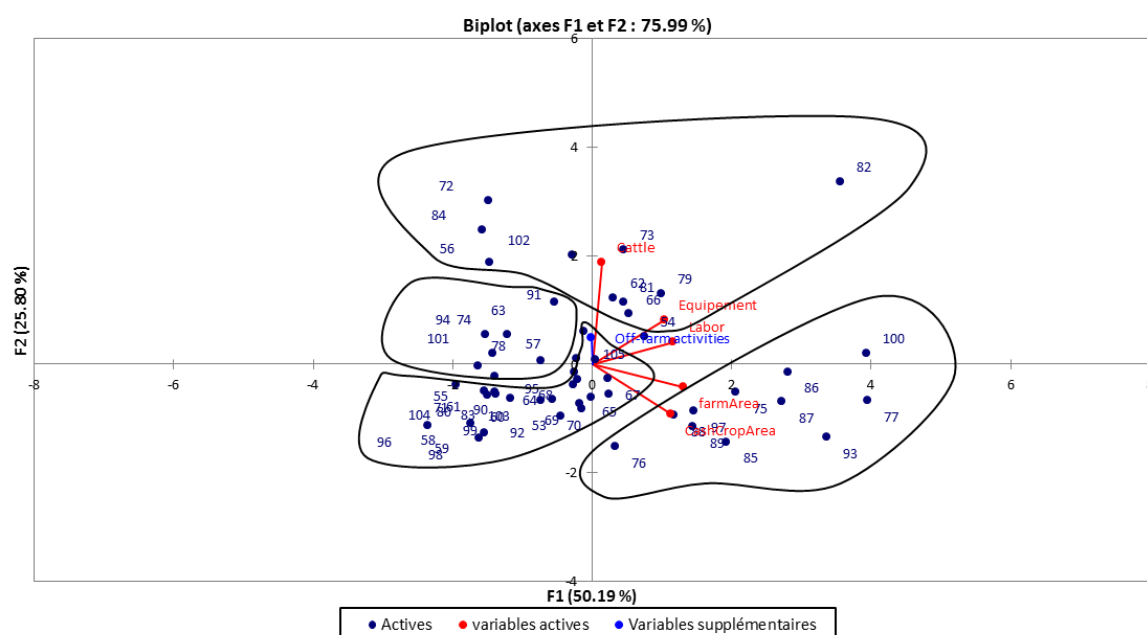


Figure 4: Principal component analysis of the farm characteristics of 53 randomly selected farms in Koumbia showing the projection of the compound replicates on the plane of the first and second principal components. 'CashCropArea' is the land area of a farm cropped with cotton; 'farmArea', the total land area of a farm; 'labor', the family labour forces on a farm; 'Equipment', the sum of the number of ploughs, seeders and carts owned by a farm and 'Cattle' the number of cattle on a farm expressed in TLU.

3.2 Feed resources throughout the year

The total number of cattle in the village was estimated at 11287 TLUs, whilst that of small ruminants was 1135 TLUs. The pastoralists are large livestock owners (on average 58 TLUs, Table 2). They themselves managed the feeding of their animals. Agro-pastoralists who own smaller numbers of animals (17 TLUs, Table 1), played the role of cattle herders in village. Crop farmers entrusted their livestock to these pastoralists for feed management notably during the rainy and hot dry seasons.

Grazing areas in the village were formed by cropland after harvest (5658 ha), rangeland (637 ha) and a part of the protected forest zone (320 ha) which represented respectively 62 %, 7 % and 4 % of the total village area (Figure 1, Table 2).

Rangelands were situated in areas of the village with stony soils (327 ha), on fallow land (141 ha), in the lowlands (163 ha) and a small area (6 ha) in a hilly zone of the village. Lowlands were only accessible for livestock during the dry season because they were located between cropped fields. Herbaceous aboveground net primary production measured during the rainy season of 2012 (from the beginning of June to the end of September) on the different types of rangeland was 3925 kg dry matter ha⁻¹ (in the hilly zone), 2632 kg ha⁻¹ (in the stony areas), 4136 kg ha⁻¹ (on fallow lands) and 5752 kg ha⁻¹ (in the lowlands) (Table 3).

Different forage resources were used by farmers to feed their animals throughout the three seasons of the year (Table 4). During the dry ‘cold’ season, crop harvest residues were the main source of fodder for cattle. Cattle consumed crop residues during daytime and were parked overnight in the field of livestock owners. Maize residues represented by far the largest amounts, compared to residues from other crops (sorghum, rice and cowpea).

The variability of available crop residues between farms within the same farm type was high. Subsistence-oriented crop farms and agro-pastoralists had on average the lowest amounts of maize residues available on their fields (on average between 6000 and 7500 kg per farm), whilst the highest amounts were produced on pastoralist farms (on average more than 10000 kg per farm).

The ratio of maize residues produced over TLU was, however, much lower for (agro) pastoralists than for crop farmers (about 200 to 400 versus 1400 kg dry matter per TLU). Part of the maize residues was stored on the farms for feeding during the dry hot season; the remaining was left on the fields and accessible for grazing by cattle from the village.

In absolute terms, pastoralists collected the highest amounts of crop residues from their field (on average almost 5000 kg maize residues per farm), whilst subsistence crop farmers collected only about 1800 kg of maize residues.

In relative terms, agro-pastoralists and pastoralists collected about 50% of the maize residues from their fields, whilst the two other farm types that were oriented towards crop production collected only about 30% of the maize residues from their fields, partly due to lack of labour or transport equipment and lower feed requirements.

Residues from other crops were not collected from the fields, except by pastoralists for feeding during the dry hot season. Again, we observed a high variability in the amounts of stored crop residues between farms within farm types.

Part of the livestock (mainly draught animals, sick animals, and dairy cows) received food supplements (e.g. cottonseed cake purchased from the cotton company or on local markets); pastoralists and agro-pastoralists purchased higher amounts of cottonseed cake than subsistence-oriented and market oriented crop farm types. Some pastoralists also produced velvet bean and used it as forage (on average 450 kg per farm).

During the rainy season, animals were conducted to rangelands to prevent crop damages, except the draught animals (oxen) which stayed on the farms for cultivation practices. Given the larger number of animals, the feed requirements of (agro) pastoralist farms were much higher than those of the other farm types. Their animals were herded on rangelands outside the village. Livestock from small (agro-) pastoralist farms was herded at relatively small distances (less than 40 km) from the home village, i.e. in the protected Mou forest (34000 ha) or in neighbouring villages for short durations (4 days to one week). The large livestock owners adopted the practice of seasonal transhumance and led their cattle far from the village, namely to the rangelands of Boromo, i.e. about 100 km away from the home village.

Availability of feed resources compared to animal feed requirements at village territory level throughout the year is shown in Table 5. During the dry 'cold' season the calculated amounts of harvest crop residue available for grazing met the estimated feed requirements of the cattle in the village (availability/need ratio of 1.27).

On the other hand, during the dry hot and rainy seasons only about 30 (rainy season) to 47 % (dry hot season) of the feed requirements were met by the estimated amounts of fodder available in the village.

Table 2: Livestock number and grazing areas in the village of Koumbia, Burkina Faso.

Total animal (TLU)	Cropland area (ha)	Rangeland area (ha)				Forest area (ha)
		Zone with stony soils	Fallow lands	Lowlands	Hilly zone	
11287	5658	327	141	163	6	320

TLU: tropical livestock unit

Table 3: Rangeland production during the rainy saeson (June-September 2012, rainfall 887 mm) in the village of Koumbia, Burkina Faso (mean values and standard deviations).

Area	Production (kg dry matter ha ⁻¹)
Zone with stony soils	2632 ± 394
Fallow lands	4136 ± 324
Lowlands	5752 ± 691
Hilly zone	3925 ± 893

Table 4: Fodder availability and requirements during the different seasons at village level in Koumbia, Burkina Faso (ton dry matter).

	Dry 'cold' season (October-February)	Dry hot season (March-May)				Rainy season (June-September)
	Crop residues available for grazing	Stored crop residues	Mucuna	Cotton seed cake	Total biomass	Rangeland biomass
Availability	13652	2448	47	160	2655	2544
Requirements*	10582			6349		8465
Ratio	1.29				0.42	0.30

* fodder requirements are calculated on the basis of a daily consumption rate of 6.25 kg dry matter per Tropical Livestock Unit (Landais and Lhoste, 1993).

Table 5: Availability of feed resources (in kg dry matter per farm) during the dry season for the different farm types at Koumbia, Burkina Faso (mean values and standard deviations)

	Dry 'cold' season									Dry hot season					
Farm type	Maize residues produced	Maize residues available for grazing*	Sorghum residues produced	Sorghum residues available for grazing*	Cowpea residues produced	Cowpea Residues available for grazing*	Rice residues produced	Rice residues available for grazing*	Mucuna produced	Maize residues stored	Sorghum residues stored	Cowpea residues stored	Rice residues stored	Mucuna stored	Cottonseed cake
Subsistence-oriented crop farmers	6005 ± 2110	4152 ± 2218			230±399	230±399	81±81	81±81		1853 ± 319					83 ± 104
Market-oriented crop farmers	9252 ± 2513	6584 ± 2378	857±977	857±977			33±35	33±35		2668 ± 2030					117 ± 29
Agro-pastoralists	7352 ± 4070	3389 ± 2958					280±485	280±485		3963 ± 1813					283 ± 76
Pastoralists	10590 ± 6068	5666 ± 4948	266±461		424±547		130±225		454 ± 240	4924 ± 4154	266±461	424±547	130±225	454 ± 240	650 ± 180

* calculated as maize residues produced minus maize residues stored

3.3 Resource flows

Incoming and outgoing resource flows recorded from March 2012 to February 2013 at farm level are shown in Figure 4 for the four farm types. Farms exported cotton, maize grain and milk to markets. In this study, we did not estimate exports in the form of meat through sales of animals. Livestock was to a certain extent kept as a buffer stock to insulate consumption from fluctuations in income, and sales varied largely between years depending on various factors such as cash needs of farmers, the strength of demand for livestock, and farmers' expectation of the nature and length of the dry and wet seasons.

Farmers also regarded cattle as heritage to be transmitted to their children. As expected, outgoing resource flows from farm to market were largest in case of market oriented farms (on average 1000 kg of maize grain and 3400 kg cottonseed per year). Farms imported nutrients from the market in the form of chemical fertilizer (compound NPK fertilizer and urea) and cottonseed cake. The largest amounts of fertilizer were imported by market oriented farms (on average about 1900 kg chemical fertilizer per year), followed by agro-pastoralist farms (about 1000 kg per year) and pastoralist farms (about 750 kg per year). Subsistence oriented farms imported about 500 kg of chemical fertilizer per year. Incoming resource flows into farms from rangeland occurred through the production of manure and deposition of faeces on the fields of the farm by animals that grazed on rangelands.

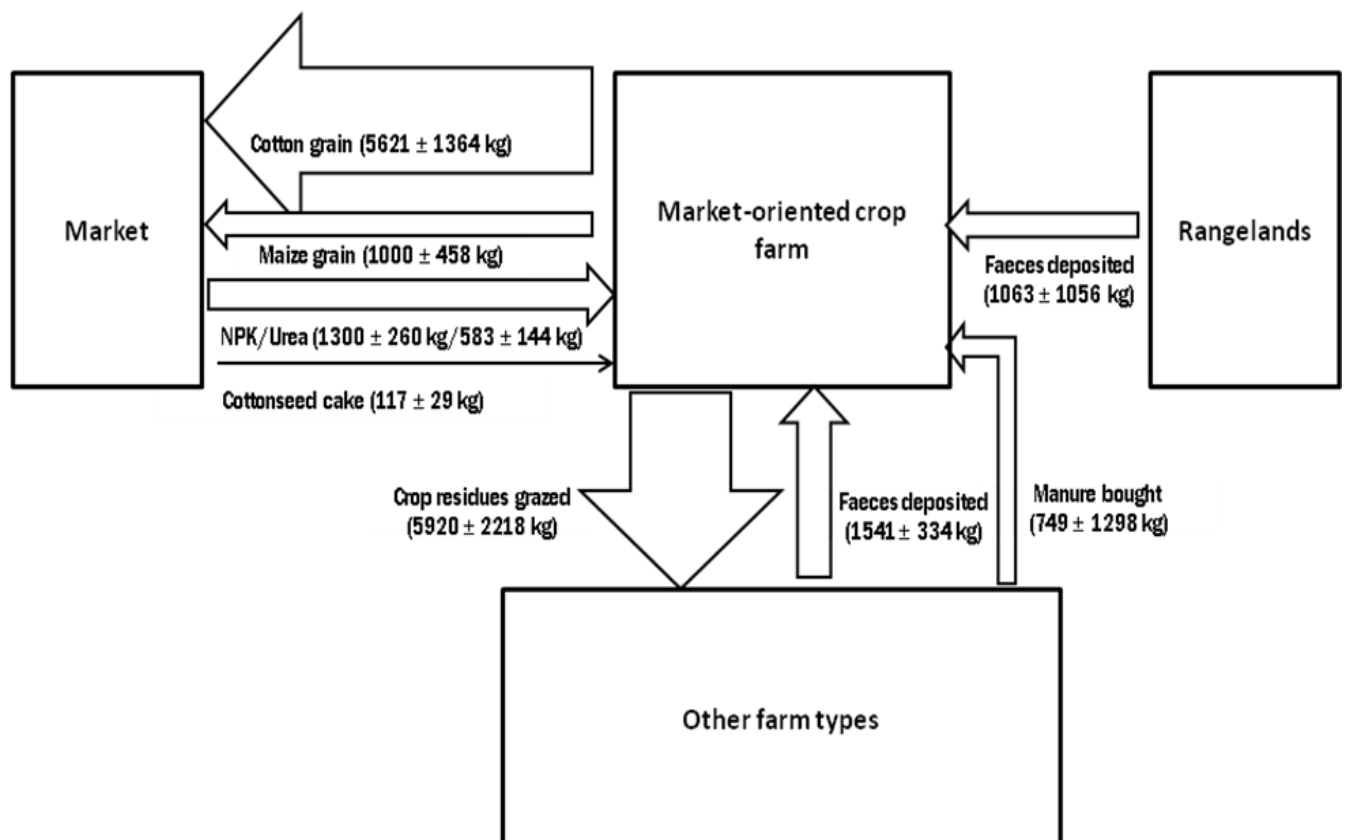
We did not consider the inflow through body gain weight of the animals when grazing outside the farm. The largest inflows from rangelands through manure occurred on the agro-pastoralist and pastoralist farms (estimated at respectively, 2400 and 4700 kg dry matter per year). Some pastoralists also collected grass from the rangeland to their farms (on average close to 500 kg dry matter per year). The exchanges between farms were mainly livestock-mediated transfers, as a result of cattle grazing on fields after crop harvests. Cattle from (agro)pastoralists grazed maize residues on fields from other farms and deposited manure on these fields. We estimated that on average 90 % of the crop residues that were not collected (and stored) from the fields of crop farmers were subsequently consumed by cattle herds of pastoralists and agro-pastoralists. On the other hand, fields of agro-pastoralists and pastoralists were almost entirely grazed by their own cattle. In this way, subsistence-oriented and market-oriented farms exported, respectively, about 3700 and 6000 kg dry matter from their fields in the form of crop residues.

The annual imports of deposited manure were estimated at 800 and 1500 kg dry matter, respectively for the subsistence-oriented and market-oriented farms. Pastoralists farms imported the highest amounts of manure via livestock (6200 kg dry matter per year), followed by the agro-pastoralist farms (2800 kg dry matter per year). Market-oriented farmers were the only farm types that purchased manure (from pastoralists). Depending on their financial and transport means, average purchased amounts reached about 750 kg of dry matter per farm per year. The manure contracts were controlled by the pastoralists; on average a pastoralist farm sold about 1000 kg dry matter of manure per year. They determined the availability of the exchangeable manure and the terms of trade (manure price or equivalence in goods). Contracts between pastoralists and crop farmers on 'night corralling', whereby pastoralists and farmers agreed that crop residues will be consumed by a specific herd in return for a guarantee that that herd will be confined on the field overnight for several nights were becoming rare in the village. Pastoralist farms also purchased significant amounts of rice straw for livestock feeding from the subsistence-oriented farms (on average 1600 kg dry matter per farm per year).

a



b



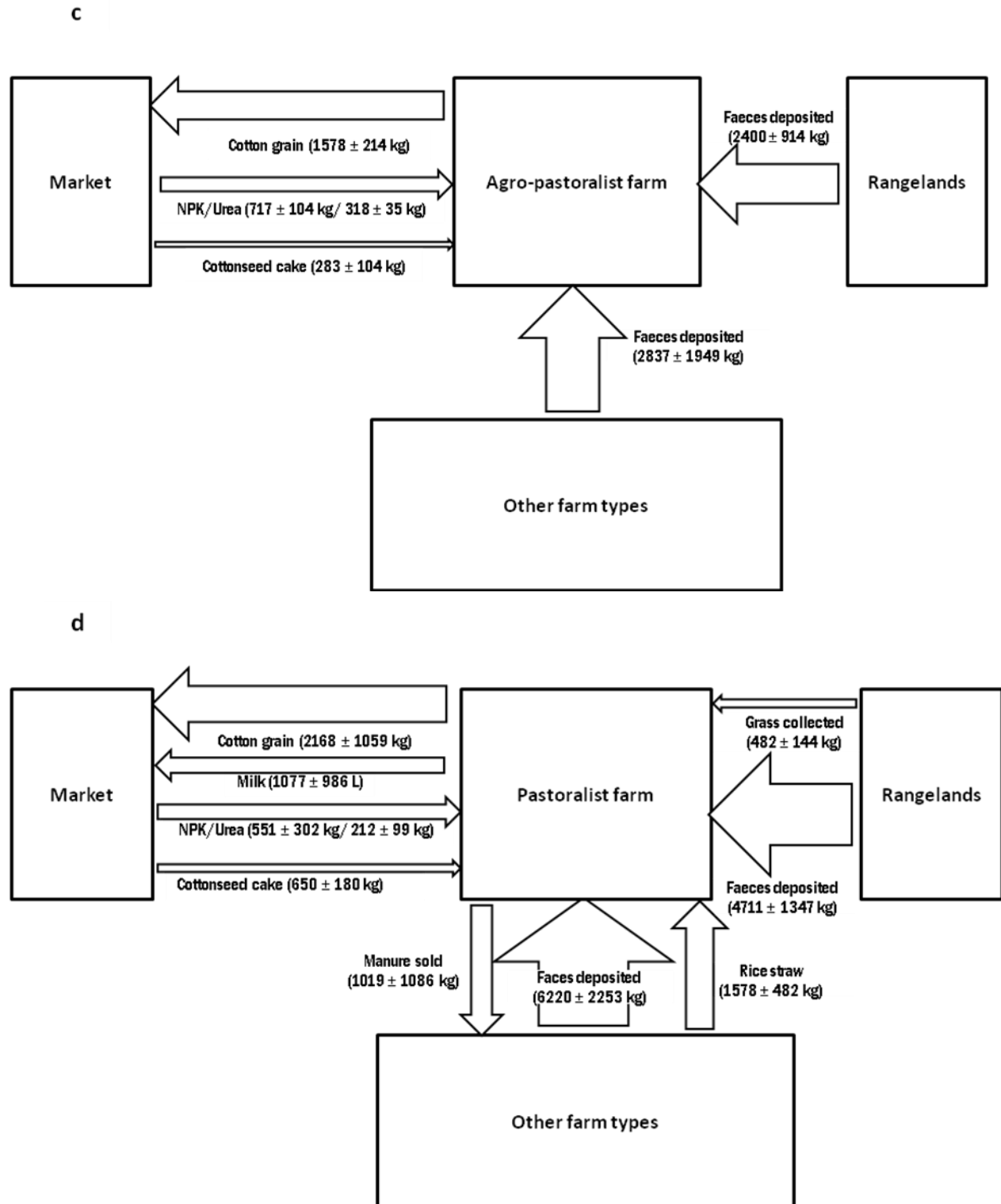


Figure 5: Annual incoming and outgoing resource flows at farm level shown for the four farm types that were identified in the village of Koumbia, Burkina Faso

3.4 Nutrient balances

Partial nutrients balances at farm level

Calculated partial balances of N and K at farm level were negative for all farm types, except for N in the case of pastoralist farms (Table 6). Market oriented farms and farms of agro-pastoralists showed the most negative N (-49 and -43 kg N, respectively) and K balances (-204 and -121 kg K, respectively). In contrast, partial balances of P were positive for all farm types to a large extent due to P fertilizer use, with the highest surpluses in case of market oriented (101 kg P ha⁻¹) and pastoralist farms (124 kg P ha⁻¹). Market oriented and pastoralist farms showed the highest ingoing and outgoing flows of N, P and K, because of largest purchases of external inputs (fertilizer and feed concentrates) from markets and the largest sales of agricultural products to markets (Figure 4). Overall, these nutrient balances reflected systematic differences in access to markets, cropping systems, land area and access to livestock as a source of manure.

Table 6: Partial nutrient balances of farms (kg farm⁻¹) in Koumbia, Burkina Faso.

	Self-subsistence oriented crop farms			Market oriented crop farms			Agro -pastoralist farms			Pastoralist farms		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Inflows	171	81	75	424	218	217	214	102	129	491	298	372
Outflows	178	43	164	474	117	421	257	80	250	468	156	464
Balance	-7	38	-90	-49	101	-204	-43	23	-121	23	124	-92

Partial nutrients balances at farm subsystems level

Table 7. shows the partial balances of N, P and K of the crop subsystem, livestock subsystem and household subsystem for each farm type. The balances were calculated from the resource flows presented in Figure S1 (see Appendix).

Partial N and K balances of the crop subsystem were negative for all farm types, whilst the P balance was positive. The most negative balances of N and K were observed for the market oriented farm type (respectively, -111 kg N and -203 kg K). Partial N, P and K balances of the livestock subsystem were slightly negative for subsistence-oriented and market-oriented crop farm types, whilst the livestock subsystems of agro-pastoralist farms showed a slight positive balance of N and negative balances for P and K.

The livestock subsystem of pastoralists showed positive balances of N and P, and a slightly negative balance of K. Balances of N and P of the household subsystem were positive for all farm types, with exception of the P balance for the agro-pastoralist farm type. Partial K balances of the household subsystem were negative for all farm types, with exception of the subsistence-oriented farm type.

Partial nutrient balances at field level

The partial N, P and K balances at field level are shown in Table 8. There was a general trend of negative balances for N and K, and of a positive balance for P for the major crops, maize and cotton, on all farm types. The supply of N and K in the form inorganic and organic fertilizer on the fields cropped with cotton and maize were in most cases not sufficient to offset the export of N and K through grains and straw, resulting in negative partial balances. Only the maize fields of pastoralist farms showed positive N balances, and zero balances for K. In case of secondary crops such as rice, sorghum, cowpea and velvet bean, there was nearly no external supply of nutrients in the form of organic or inorganic fertilizer on the fields, resulting in overall negative N, P and K balances.

Table 7: Partial nutrients balance of farm subsystems (kg sub-system⁻¹) in Koumbia, Burkina Faso.

Sub-system	Self-subsistence oriented farm			Market oriented farms			Agro -pastoralist farm			Pastoralist farm		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Crop subsystem												
Inflows	106.6	65.1	47.7	292.8	185.3	143.1	121.9	80.4	72.3	249.1	150.2	197.8
Outflows	161.7	33.3	144.0	403.9	86.0	346.3	178.1	38.1	162.3	288.6	56.7	240.2
Balance	-55.1	31.8	-96.4	-111.1	99.3	-203.1	-56.2	42.3	-90.0	-44.8	93.5	-42.4
Livestock subsystem												
Inflows	13.4	2.1	14.9	40.0	8.1	50.1	67.1	15.2	51.0	162.0	124.9	148.4
Outflows	14.3	9.0	18.0	40.3	25.5	50.5	59.7	38.2	74.4	132.1	77.2	151.8
Balance	-1.0	-6.9	-3.1	-0.3	-17.3	-0.4	7.4	-23.0	-23.03	29.8	47.7	-3.4
Household subsystem												
Inflows	51.4	13.8	12.0	91.5	24.9	23.4	25.0	6.7	5.9	85.3	23.2	26.3
Outflows	1.9	0.9	2.7	29.6	6.0	24.0	19.2	3.2	13.8	47.0	22.2	72.2
Balance	49.5	12.9	9.3	61.9	18.9	-06.1	5.8	-3.5	-7.9	38.3	1.0	-45.9

Table 8: Partial nutrient balances at field level (kg ha⁻¹) for the different farm types in Koumbia, Burkina Faso.

Crops	Self-subsistence oriented farm			Market oriented farm			Agro -pastoralist farm			Pastoralist farm		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Cotton												
Inflows	35.4	23.0	15.6	58.2	32.5	25.5	40.4	28.1	22.1	57.9	38.2	49.6
Outflows	47.1	10.3	42.2	72.6	15.7	61.6	55.8	12.1	50.1	75.4	16.6	67.3
Balance	-11.8	12.7	-26.7	-14.4	16.8	-36.1	-15.4	16.0	-28.0	-17.5	21.6	-17.7
Maize												
Inflows	55.5	28.8	21.7	53.4	33.5	28.7	42.5	26.1	25.9	83.1	51.4	67.8
Outflows	58.7	11.4	61.9	56.6	11.8	50.2	52.1	10.7	48.8	77.9	16.4	67.8
Balance	-3.2	17.4	-40.2	-3.2	21.7	-21.6	-12.9	14.9	-25.2	5.2	35.0	0.0
Rice												
Inflows	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.3	1.4	5.2	0.0	0.0
Outflows	14.0	3.5	14.6	6.9	1.5	4.6	8.4	1.9	8.7	11.9	2.8	12.5
Balance	-14.0	-3.5	-14.6	-6.5	-1.5	-4.6	-7.0	0.4	-7.3	-6.7	-2.8	-12.5
Sorghum												
Inflows	-	-	-	0.0	0.0	0.0	-	-	-	3.7	0.0	0.0
Outflows	-	-	-	26.7	4.8	19.9	-	-	-	8.0	1.4	8.2
Balance	-	-	-	-26.7	-4.8	-19.9	-	-	-	-4.3	-1.4	-8.2
Cowpea												
Inflows	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0
Outflows	18.7	2.6	8.9	-	-	-	-	-	-	13.5	1.5	7.0
Balance	-18.7	-2.6	-8.9	-	-	-	-	-	-	-13.5	-1.5	-7.0
Mucuna												
Inflows	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5	0.0	0.0
Outflows	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	0.5	8.0
Balance	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.3	-0.5	-8.0

4. DISCUSSION

4.1 Farm typology

Based on farm characteristics as total land surface, labour availability, livestock numbers and farm production orientations, we identified four farm types in the village of Koumbia: subsistence-oriented crop farmers, market-oriented crop farmers, agro-pastoralists and pastoralists (Table 1). The majority of the farms in the village (almost 50 %) are subsistence-oriented farms. These are the smallest farms (in terms of family members, land area and livestock numbers) that realize limited financial profits from their agricultural activities. Seasonal off-farm activities are an important source of income for this type of farms and some family members have left the farm in search for full employment elsewhere. For market oriented crop farmers the cultivation of cotton plays a central role in their farming activities. In exchange for the exclusive marketing of their cotton to the state-controlled cotton company SOFITEX (Société Burkinabè des Fibres Textiles), farmers are provided with improved seeds, extension services, chemical fertilizers, pesticides, and marketing services. Agro-pastoralists arose from crop farmers with substantial family labour enabling the cultivation of cotton (and maize) on large areas of land, and who have subsequently invested their surplus revenues in livestock. In the absence of savings and credit institutions in the region, livestock are seen as a source of liquidity and investment capital to be used to acquire other assets needed to gain entry to other livelihood activities. Moreover, the growing transaction costs involved in securing manure contracts between crop farmers and pastoralists also provide an increased incentive for crop farmers to own livestock to secure manure and other livestock goods (Turner M., 1995 ; Scoones, and Toulmin, 1995). The pastoralists (Fulani) in the study region have shifted towards a sedentary type of farming system, including the cultivation of crops. Our farm typology is a representation of the current composition of farm categories in the village of Koumbia. However, the typology is also relevant for categorizing farmers in other regions of the Sudano-Sahel region (Dongmo et al. 2012b). The four farm types that we identified are comparable to those identified earlier by Vall et al. (2006) in the same region, but in general show smaller land areas and livestock numbers. This may be due to the continuing subdivision of farms in the region (with the partitioning of land, livestock, equipment), notably among sons following the decease of the head of the household. Previous studies indicate that over the last decade the number of farms in Koumbia has increased from about 590 (Vall et al. 2006) to 850 (Coraf, 2012).

Another explanation for declining livestock numbers, notably on pastoralist farms, is the privatization of grazing resources in the village. In particular, the conversion of communal grazing land to private cropland (Reenberg et al., 1998 ; Matthew et al., 2005) has put pastoralists under pressure to reduce their livestock numbers and relocate their cattle in other areas outside the village.

4.2 Availability of feed resources

Our assessment of the availability of feed resources versus the feed requirements of cattle indicates a strong deficit in feed availability in the village during the dry hot and rainy seasons (Table 4). The dry hot season has always been a difficult period for livestock feeding in the region; stocks of fodder on the farms are limited (Table 3 and 4) and the productivity of rangelands is almost nil at that time of the year. The only other source of fodder is the wetlands. Cattle lose considerable weight during this period of the season (Senock & Pieper, 1990). The critical period for livestock feeding has, however, extended beyond the dry hot season. The contribution of rangelands during the rainy season to provide livestock with feed resources has declined in the villages of the study region, because of the expansion of cropping areas by farmers (mostly immigrants), leading to a significant restriction of rangeland areas, overgrazing and declining productivity (Dongmo et al., 2012 ; Turner et al. 2005; Vall et al. 2006). This is a general trend, also occurring in other parts of semi-arid and sub-humid sub-Saharan Africa (Turner et al. 2005 ; Adriansen, 2006 ; Hiernaux et al., 2009). For example, in a study in Ethiopia, Mekasha et al., 2014 showed that the increase in cropland over the last 30-40 years has reduced free movement of livestock and had major implications on cattle feeding strategies, with an increase in the contribution of crop residues and other feeds from croplands (weeds and crop thinnings) as compared to feeds from grasslands.

We estimated that biomass from rangelands in the village of Koumbia provided only about 30% of the feed requirements of the cattle (Table 5). As a consequence, owners of large herds send their cattle on transhumance for prolonged periods (the entire rainy season) to distant areas (75 to 100 km) outside the village. Only a small proportion of the cattle (working animals, lactating cows and sick animals) are kept near the homestead and herded on fallow land, on the hilly rangeland areas of the village and on other non-cultivated areas between cropped fields. The risk of conflicts with crop farmers is high during this period of the year, because of damage that grazing cattle can cause to cultivated crops.

During the dry 'cold' season, crop residues left on the fields are the major source for livestock feeding. In Koumbia, feed requirements of the cattle during the dry 'cold season' are theoretically satisfied by grazing crop residues on fields (Table 5). During this season all herds are free to exploit crop residues on all fields. The dates of free grazing in Koumbia vary from year to year and are set by local leaders. (Agro)pastoralists actively search for fields where crop residues are abundant and practice night grazing during this period of the year. Night grazing is an important herd management strategy for improved animal performance, especially in the dry season, when available forage is low and the quality is poor (Ayantunde et al., 2000). However, crop farmers who also own animals usually consider that their cattle have priority rights over the residues on their own fields. This competition for crop residues leads to increased collection and storage of crop residues by individual farmers for their own livestock, reducing the period during which crop residues are amply available on croplands for free grazing by cattle from the village. In general, it has been observed that with increased animal pressure and competition for resources, free grazing gives way to the harvesting of crop residues, which are fed to the farmers' own livestock or sold to other farmers (Powell et al., 2004). Crop farmers collect on average 30% of their maize residues, corresponding to about 1800 kg (self-subsistence farmers) and 2700 kg (market oriented farmers) (Table 4). Overall, they have limited amounts of crop residues, due to the small land sizes and low crop productivity. The quantities of harvested crop residues also depend on the farmers' means (transportation, labour) to realize this before the free grazing periods of fields starts. Agro-pastoralists and pastoralist stock about 50% of their maize residues for feeding during the dry hot season (Table 4). Although pastoralists stock higher amounts of crop residues than the other farmers, their feeding deficit is much higher because of the large number of animals. The amount of stored fodder (including velvet bean and cottonseed cake) by pastoralists represents only about 20% of the feed requirements of their cattle in the dry hot season. As a result, a large part of their cattle stays for long periods in neighbouring localities in search of pasture grasses in wetlands. For the cattle remaining in village (working animals, lactating cows and sick animals), pastoralists are obliged to buy concentrates for feeding, such as cottonseed cake, grow fodder (e.g., velvet bean) or buy crop residues from other farmers. Exchanges of harvested crop residues between farmers were, however, rare in Koumbia, and were mostly done on the basis parental relationships.

4.3 Resource flows and nutrient balances

The purchase of chemical fertilizer constitutes an important incoming flow of nutrients into farms (Figure 4). They are mainly used for cotton and maize production. Cotton growers can obtain chemical fertilizer on credit through the cotton company.

Other farmers purchase fertilizers from local traders. Additional nutrients may also be introduced in the form of purchased feed concentrates, such as cottonseed cake.

The extent of maize and cotton production and the limited availability of manure on market-oriented farms explain the highest use of chemical fertilizers on this type of farms. (Agro)pastoralists are also purchasing important amounts of chemical fertilizer for their crop production, since the manure produced on their farms is not sufficient. Due to the limited areas of rangeland in the village a large part of the cattle herd grazes and stays during the rainy season in localities outside the village, from where it is difficult (time and labour consuming) to collect manure.

These external inputs through chemical fertilizer and feed concentrates are however insufficient to compensate the outputs of N and K through crop harvests and milk sales. Partial N and K balances were generally negative at field and farm level, with exception of the N balance of the pastoralist farms (Table 6 and 8). On the medium to long-term this creates problems with soil fertility and undermines sustainable crop production. It is widely believed that nutrient balances of sub-Saharan African farming systems are negative, suggesting potential problems of soil mining, especially for N and K; while for P the trend is less remarkable (Smaling et al. 1993; Powell et al., 1996). However, there is high variability in nutrient balance estimations reflecting the large diversity of land use systems: positive balances are found e.g., in gardens, fields close to the homesteads, and wealthier farmers' fields (Harris, 1998 ; Ramisch, 2005 ; Cobo et al., 2010).

It should also be noted that dust-laden Harmattan winds contribute to a more positive balance of K and other cations in the Sahel region, with for K a yearly input that is estimated at about 2.8 kg K ha⁻¹ (Drees et al., 1993). Areas with a good vegetation cover, like fallow sites, particularly benefit from dust depositions. Unprotected surfaces, however, lose more fine soil and nutrients by suspension transport than they gain from dust inputs (Sterk et al., 1996). In general, positive nutrient balances depend strongly upon the quantities of commercial fertilizer used.

Van Keulen and Breman, 1990 concluded that in the West African Sahel an increase in crop productivity can only be realized through inputs (fertilizers and/or concentrates) from outside the farm.

4.4 Role of livestock

Livestock plays a major role in the transfer of organic matter and nutrients between farms and to farms from the natural rangelands and fallow land (Figure 4). When cattle return from rangelands and are corralled overnight on farmer fields, a large part of their faeces and urine is excreted on these fields. Parking animals in fields during the night is practiced to produce manure as a means to increase soil fertility, but this only tends to happen in the fields of pastoralists or farmers who have large numbers of animals outsourced with the pastoralists. Farmers who retain cattle in the farm compound at night and produce manure that is taken afterwards on the fields also harvest nutrients from rangelands. These livestock-mediated transfers of organic matter and nutrients from non-cultivated to cultivated areas are one of the major determinants of the maintenance of soil fertility in the semi-arid and sub-humid regions of West Africa, at least for farms with a significant number of cattle (Achard et Banoin, 2003; Schlecht et al., 2004). However, it implies that the rangelands and fallow land are mined for nutrients, especially when the ratio of rangeland to cropland is low and grazing is intense. Through the communal grazing system with free access to crop residues on neighbouring fields, (agro)pastoralists are supplied with fodder for their cattle, and crop farmers are provided with manure from grazing livestock for maintaining the soil fertility of their fields. However, it is recognized that the value of this manure (faeces and urine) in improving soil fertility is low (Harris., 2002). For example, (Powell and Mohamed Saleem (1987) showed that cattle grazing crop residues for half of the dry season contributed 1.7 kg N ha⁻¹ and 0.3 kg P ha⁻¹ to cropland. The manure remains exposed to heat, sunshine and drying winds for several months before being incorporated into the soil, resulting in severe nutrient losses. Moreover, sedentary Fulani pastoralists increasingly use the manure for their own fields through corralling their cattle overnight on their own fields, when they produce most of the manure. Estimations in Mali indicate that cattle confined to a corral overnight deposit 43% of their daily faecal excretion in the corral (Schlecht, 1995). Cattle are usually shifted between corrals to fertilize several fields and to avoid soil compaction. Overnight corralling of livestock on fields between cropping periods allows more nutrients (from faeces plus urine) to be recycled than if livestock are kept outside cropping areas and only manure (most urine is lost) is available for recycling (Powell et al. 2004).

Thus, the practices of free grazing of crop residues results in a net transfer of organic matter and nutrients from the fields of crop farmers (with few animals) to the fields of the (agro)pastoralists owning the largest herds. Consequently, soil fertility declines on a large part of the fields in the village, especially those of crop farmers with few animals.

5. CONCLUSIONS

Our current diagnosis around differential management strategies as determined by farm diversity in the village territory of Koumbia, which is representative for the cotton growing area in sub humid West Africa, led us to infer that the dynamics of agro-pastoral systems in the study area are not sustainable. Overall, the N and K balances of fields and farms are negative, for the great majority of the farmers. The farms of the pastoralist farmers show somewhat positive balances, mainly due to the fact that they transfer via their cattle in the form of manure relatively large amounts of nutrients from rangelands and from fields from other farms. Available manure from cattle in the village is used to fertilize the fields of the livestock owners, rather than pastoralists providing manure to crop farmers, as was the case in the past. As a result, the cropped land of farmers with few livestock and the rangelands are continuously mined for nutrients, making the current system unsustainable in the medium to long term. The contribution of village rangeland in feeding of livestock became very low with a large part of village cattle staying and grazing in neighbour localities during the rainy season. This means that a large part of the produce of manure is no longer returned to the fields of the village. In addition, the privatization (and marketing) of crop residues lowers the attractiveness of an area for grazing by herds from (agro)pastoralists. As more intensive modes of crop production are adopted in areas with increased population density, all crop harvest residues may be collected for livestock feed and/or for sale.

The major part of nutrients is now entering into farms via purchase of fertilizer and feed concentrates from markets. Yet, market-oriented farms tend to show the most negative nutrient balances because they also have the largest exports of nutrients from their farms in the form of harvest products. In general, high prices of fertilizers and feed concentrates are preventing to obtain sufficient quantities of these resources to offset the negative nutrient balances. To prevent further nutrient mining, current systems will have to shift towards more intense use of external inputs, mainly fertilizers. This becomes an option for farmers if markets become attractive and accessible.

CHAPTER 3: SOIL VARIABILITY AND CROP YIELD GAPS IN VILLAGE LANDSCAPES OF BURKINA FASO²

This chapter is published as :

Diarisso T., Corbeels M., Andrieu N, Djamien P., Douzet J.M. and Tittone P. (2015), Soil variability and crop yield gaps in village landscape of Burkina Faso. Nutrient cycling in agroecosystems.

Soil variability and crop yield gaps in village landscapes of Burkina Faso

Abstract

Low crop yields in the Sudano-Sahelian zone of West Africa are commonly attributed to rainfall deficits and poor soil fertility. In this study, an assessment was made on how the position of fields belonging to different farm types can explain soil variability and related crop yield gaps in two villages in Burkina Faso, Yilou and Koumbia, located, respectively, in the Sudano-Sahelian and Sudanian agro-ecological zones. In each village, four farm types were identified. Soil fertility was generally poor and use of nutrient inputs low in most of the farmer's fields. As a consequence, yields for most crops were low, but differences among farm types were found, which can be linked to their socioeconomic characteristics that influence the amount of inputs used. Application of fertilizers differed also between fields within farms and tended to be greater on the fields near the homesteads, especially for organic fertilizers in the village of Yilou. At both villages, the rates of N and K inputs were insufficient to compensate for their respective output rates, leading to negative partial nutrient balances. The existence of patchworks of soil fertility gives rise to a wide variation in crop responses to fertilizers. Exploitable yield gaps were substantial and to a large extent related to the low fertility status of soils and sub-optimal fertilizer applications.

Keywords: farm typology, nutrient balances, resource use efficiency, soil fertility gradients, West Africa.

1. INTRODUCTION

Efforts to restore soil productivity and narrow current crop yield gaps in smallholder agriculture require targeted design of management interventions to address the various factors that simultaneously limit crop productivity in agricultural landscapes in space and time. In Sudano-Sahelian agro-ecosystems such factors refer chiefly to rainfall variability (Traore et al., 2013) and soil fertility (de Ridder et al., 2004), in combination with the constraints that issue from the particular patterns of communal natural resource management in West African village territories (Achard and Banoin, 2003; Andrieu et al., 2014 ; Schlecht et al., 2006). Current assessments of yield variability and yield gaps with respect to exploitable and water-limited crop yield potentials indicate that gaps are widest in smallholder family agriculture (van Ittersum et al., 2013), particularly in sub-Saharan Africa (Tittonell and Giller, 2013). Yet studies assessing such gaps at finer scales of analysis (Affholder et al., 2013) show that there is wide variability in crop yields, both actual and potential, within smallholder agricultural landscapes. This variability may be associated with both resource availability and resource use efficiency along spatial gradients of soil fertility (Tittonell et al., 2008b). Soil variability in West African village landscapes is largely associated with the spatial distribution of land use types and with the flows of carbon and nutrient resources mediated by livestock grazing and manure management (Achard and Banoin, 2003; Diarisso et al., 2014; Schlecht et al., 2004). Farmers often recognize this variability in their decisions on how to manage land, and ascribe vernacular names to specific soil types, landscape positions or soil quality classes (Corbeels et al., 2000; Mairura et al., 2007). Variability in soil properties across landscape positions, land use types and even the micro-variability associated with manure applications within individual field plots has been widely documented in the region (Brouwer et al., 1993, Gandah et al., 2003, Maccarthy et al., 2013 ; Ofori et al., 2013). In particular, Prudencio (1993) describes the effect of ‘ring’ management in smallholder villages in Burkina Faso and documents strong gradients of decreasing soil fertility with increasing distance from the village homesteads – a pattern that has also been described in other parts of Africa (Masvaya et al., 2009; Tittonell et al., 2005b; Zingore et al., 2007). Fields that receive greater annual inputs of organic and mineral fertilizers tend to exhibit better soil fertility indicators, notably the fields near the homesteads, which are also planted earlier and weeded more frequently (Tittonell et al. 2005b).

Such patterns of spatial soil variability tend to disappear or become less evident as the population of rural areas increases (Valbuena et al. 2014), largely due to land subdivision, immigration of new ethnic groups, greater livestock numbers and changes in the spatial organization of village territories (Dugue et al., 2004, Powell et al., 2004). The presence of cash crops such as cotton that ensure access to mineral fertilizer inputs via contract farming can substantially influence the flows and balances of carbon and nutrients in the landscape. Most of the studies documenting spatial soil variability in West Africa consider the diversity of soil management practices across different household types in a rather implicit way, without considering its explicit interaction with spatial patterns of soil and crop variability. Yet the socioeconomic diversity of households, in terms of resource endowment, production orientation or access to input/output markets, may play a major role in explaining diversity of management practices that impact on soil fertility and crop yields.

Targeting multiple crop yield limiting factors operating in heterogeneous landscapes requires a form of ‘landscape agronomy’, focusing on the relations among farming practices, natural resources and landscape patterns (Benoît et al. 2012) and relying on principles of precision agriculture: spatially explicit, time-specific and knowledge intensive management, adapted to smallholder agriculture through the use of local ecological knowledge (Tittonell, 2014).

Coupling information on soil variability across landscape positions, soil management histories and socio-economic household diversity can inform better targeted recommendations to improve soil productivity, reduce crop variability and narrow yield gaps. The objective of this study is to assess how the position of fields belonging to different farm types in a communally managed agricultural landscape of two villages in Burkina Faso can explain soil and crop variability, yield gaps and resource use efficiency, and whether general spatial patterns can be derived to inform targeted design of management interventions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Site characterization

The study was carried out in the villages of Yilou (1°32'50" W; 13°01'04" N) and Koumbia (3°41'15" W; 11°14'47" N) located in the provinces of Bam (central Burkina Faso) and Tuy (south-western Burkina Faso), respectively. The two villages show contrasting conditions in terms of climate and cropping systems (Table 9).

Rainfall pattern is unimodal in both villages, with approximately eight months of dry season. The Koumbia village is situated in the cotton-growing region of Burkina Faso, representative of the Sudanian agro-ecological zone with annual rainfall between 800 and 1100 mm.

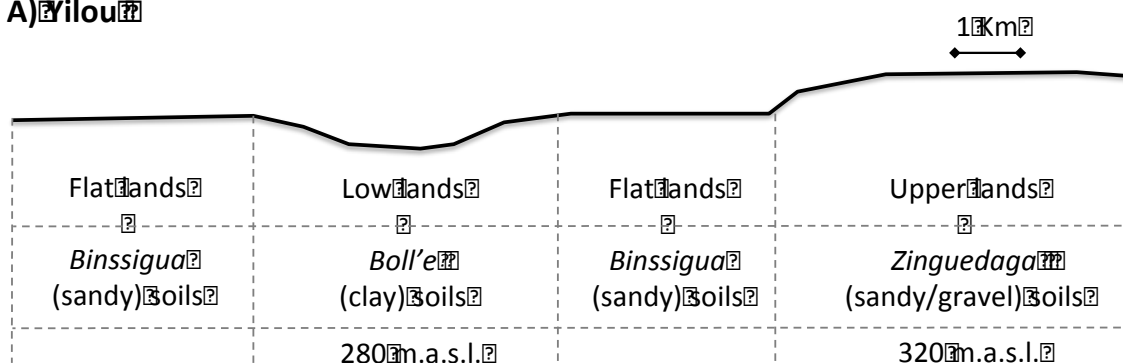
Yilou, located in the Sudano-Sahelian agro-ecological zone, receives between 400 and 700 mm rainfall per year. This latter village territory is characterized by severe soil degradation materialized by patches of unproductive areas, with reduced water infiltration and storage capacity.

During the severe droughts of the 1970s farmers from central Sudano-Sahelian zone of Burkina Faso – belonging to the Mossi ethnic group - migrated in large numbers from their home regions to the south-western regions (Sudanian zone), which were historically inhabited by members of the Bwaba ethnic group (Gray, 1999). Both ethnic groups are traditionally crop farmers. In both villages, Fulani people (traditionally nomadic pastoralists) have settled in “hamlet” areas during the 1970s and 1980s, and started to invest in cropping activities at various levels of intensity (Dongmo et al., 2012). On the other hand, the traditional Mossi and Bwaba crop farmers have also begun to invest in livestock activities. Today, most production systems in the two villages consist of an integration of livestock and annual crops on the same farm to benefit from animal traction and manure for soil amendment. Landscape in both villages is fairly flat with however upland and lowland areas (Figure 6), alternatively allocated to crop cultivation or livestock grazing.

Table 9: Main characteristics of the two study sites

Sites	Yilou	Koumbia
Rainfall (mm)	550 (400 – 700)	900 (800 – 1100)
Dominant soil types	Lixisols	Luvisols, Lixisols
Ethnic groups	Mossi, Fulani	Bwaba, Mossi, Fulani
Population density (persons km ⁻²)	70	60
Farm size (ha)	1.0 – 7.0	4.5 – 10.2
Main crops	Sorghum, millet, cowpea	Cotton, maize

A) Yilou



B) Koumbia

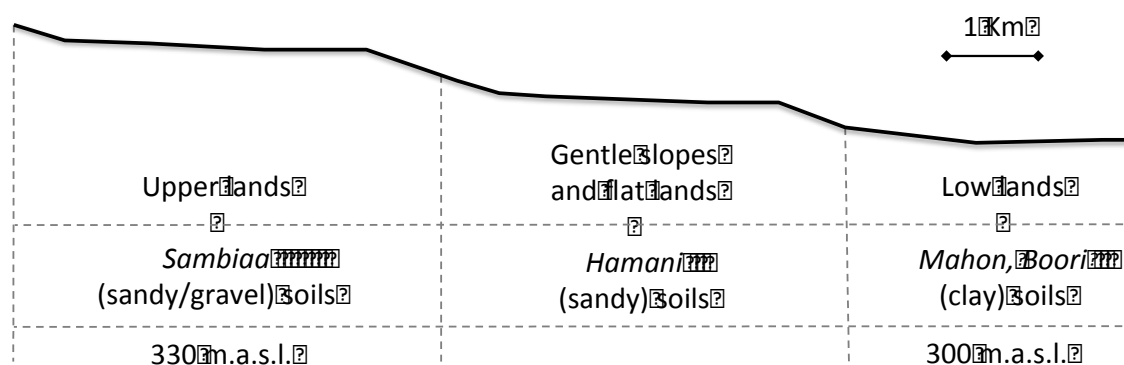


Figure 6: Approximate topographic profiles and schematised soil toposequences in the two village territories, indicating local soil names and the average altitude at the highest and lowest landscape positions.

2.2 Farm and field surveys

Individual household surveys to characterize farms were conducted between September and October 2012 in both villages. Lists of farms of both villages were proposed by the Prefecture of Guibaré in the case of Yilou and by the Cotton Farmer Group in the case of Koumbia, from which respectively 52 and 53 farms were randomly selected for the farm characterization surveys. The selection of farms within each village territory was stratified per ward, in order to cover the diversity of landscape situations and ethnic groups in the each village territory.

It has to be noticed that members of ethnic groups that arrived in different migration phases tend to be spatially concentrated. A questionnaire was implemented to collect information on socioeconomic aspects of the households (size of farm, assets, crop and livestock systems, market access, off-farm activities, etc.) and aspects related to soil fertility and crop management.

Farm characterization data collected were subsequently used to build for each village a typology of farms based on their structural characteristics (total farm area, labour, cash crop area, cattle number, % off-farm activity) and their production orientations. Principal component analysis and ascendant hierarchical clustering methods were used to discriminate and to reassemble farms into four homogeneous groups based on their similarity according to structural variables (Diarisso et al., 2015). The following farm types were identified: subsistence-oriented crop farmers (T1), agro-pastoralists (T2), market-oriented crop farmers (T3) and off-farm income-oriented farmers (T4) in Yilou, and subsistence-oriented crop farmers (T1), agro-pastoralists (T2), market-oriented crop farmers (T3) and pastoralists (T4) in Koumbia. The main structural and socioeconomic characteristics of these farm types are presented in Table 10. In both villages subsistence-oriented crop farmers represented the majority of farmers (54% in Yilou and 44% in Koumbia). Agro-pastoralists in both villages had a significant number of livestock, but crop production is also important. For pastoralists in Koumbia, building up a large cattle herd remains both a primary economic and social prestige goal, but part of their investments also went into crop production, with the acquisition of land in the village. Three representative farms were selected from each group as case studies for in-depth analysis of crop and soil management decisions, crop yield assessments and soil sampling. This selection was done during village transects walks, selecting where possible those farms that possessed fields at different landscape positions (uplands, flat terraces and lowlands, Figure 6).

Table 10: Diversity of farm types (T1 to T4) in the two villages and their main structural and socioeconomic characteristics (averages followed by standard deviations)

Farm type	Proportion (%)	Family size	Family labour	Total area (ha)	Livestock (TLU [§])	Equipment #	Off-farm income (%)	Cash crops (ha)*
Yilou								
T1. Subsistence-oriented crop farmers	54	17 ±5.9	7 ±4.3	3.8 ±1.0	9.6 ±5.3	3.3 ±2.3	22 ±8.0	0
T2. Agro-pastoralists	17	21 ±8.9	14 ±6.0	7.0 ±5.0	37 ±19	3.7 ±2.1	18 ±8.0	0
T3. Market-oriented crop farmers	15	16 ±4.0	9.7 ±4.2	4.9 ±0.4	5.0 ±1.2	2.7 ±1.2	20 ±10	0.1 ±0.4
T4. Off-farm income-oriented farmers	14	10 ±4.2	6.3 ±4.0	1.0 ±0.5	0.9 ±0.7	2 ±1.0	40 ±5.0	0
Koumbia								
T1. Subsistence oriented-crop farmers	44	6.0 ±3.2	4.5 ±2.6	4.5 ± 2.5	4.3 ±3.5	2 ±0.6	15 ±15	1.8 ± 1.6
T2. Agro-pastoralists	17	21 ±7.5	12 ±5.1	7.8 ± 2.6	17.2 ±3.5	3 ±0.6	10 ±9.0	4.5 ± 0.9
T3. Market-oriented crop farmers	26	9.0 ±2.9	7.0 ±1.1	10 ± 2.6	6.7 ±1.7	3 ±1.0	8 ±10	5.9 ± 1.5
T4. Pastoralists ^{&}	13	23 ±5.8	13 ±4.0	6.9 ± 3.5	58 ±13.7	2 ±1.1	12 ±10	1.6 ± 1.5

[§] TLU: Tropical Livestock Unit.

[#] Equipment is defined as the sum of number of ploughs, seeders and carts owned by a farm

*Cotton in Koumbia; vegetables in Yilou;

[&] Practising a form of transhumance during variable periods of time in the year;

The history of land use and soil fertility management of each field of the 12 selected farms (totalling 63 fields at Yilou and 60 at Koumbia), as well as current management practices, crop rotation, planting dates and other management decisions were reconstructed in discussions with the farmer and other members of his/her family. Amounts of applied mineral (N-P-K and urea) and organic fertilizers (manure, household waste, compost) were quantified. Applied N-P-K and urea fertilizers were reported by farmers in bags of 50 kg and converted in kg nutrient ha⁻¹. Application rates of animal manure, household waste and compost were in local units of measure i.e. carts, and also converted to kg nutrient ha⁻¹. On each field of the 12 selected farms three sub-plots of 3 x 3 m were delineated at random positions to determine crop biomass and grain yield at harvest. All plants within each sub-plot were harvested and dry weights of grain and straw biomass were determined separately. Yield assessments were done at the end of the 2012 season (October).

2.3 Soil sampling and analyses

Composite topsoil samples were taken in May 2012, before the onset of the rainy season from all fields of the case study farms selected in each village (63 fields at Yilou and 60 at Koumbia). The samples were collected with an auger at a depth of 0-20 cm along the two main diagonals of each field, at intervals of 15-20 walking steps, depending on the size of the field. At least 10 sub-samples of soil were collected per field, which were combined to form one composite sample of 500 g soil per field. The composite samples were air-dried and ground to pass a 2 mm screen before chemical analysis and packed in plastic bags labelled with information on field location, crop cultivated, date of sampling and name of the farmer.

Chemical analyses of the composite soil samples were done using standard methods for tropical soils to determine soil pH, organic carbon (C), total nitrogen (N), available phosphorus (P) and exchangeable Ca, Mg, K and Na. Soil pH was measured by determination in water. Soil organic C and total N were determined after dry combustion and using an elemental analyser (Laboratoire Sol du CIRAD, 2004). Available P was determined with the Bray 1 method (Pierzynski, 2000). Exchangeable Ca, Mg, K and Na were measured using the neutral 1N ammonium acetate method (Laboratoire Sol du CIRAD, 2004).

2.4 Calculations and data analysis

Partial N, P and K balances were calculated for each field following the methodology described in Diarisso et al. (2014), considering inputs of mineral fertilizer, organic manure, compost and household waste, and outputs in harvested grain and crop residue biomass. For each field the average biomass yields of the three sub-plots were used for these calculations and for further statistical analysis. Yield variability within plots is represented by the coefficient of variation between the three subplots assessed within each field. Nutrient use efficiencies were calculated as follows:

$$ARF_X = (Y_F - Y_0) / X_F \quad (\text{Eq. 1})$$

$$XUE = Y / (X_O + X_F + X_S) \quad (\text{Eq. 2})$$

where, X represents either N, P or K; ARF_X is the agronomic response to mineral fertilizer X ; Y is the crop grain yield (Y_F is the yield with mineral fertilizer while Y_0 is the yield obtained in unfertilized fields); X_F is the amount of nutrient X applied as mineral fertilizer; X_O is the amount of nutrient X applied in organic amendments; XUE is the use efficiency of nutrient X ; and X_S is the soil supply of nutrient X .

The soil availability of N, P and K were calculated using soil analytical data following the approach proposed by Janssen et al. (1990), by which the potential soil supply of N (SN), P (SP) and K (SK) are estimated through the following empirical equations:

$$SN = 17 \times N_{tot} \times (pH - 3) \quad (\text{Eqn. 3})$$

$$SP = 0.5 \times P_{avail} + 0.35 \times C_{org} \times (1 - 0.5 \times (pH - 6)^2) \quad (\text{Eqn. 4})$$

$$SK = 250 \times (3.4 - 0.4 \times pH) \times K_{exch} / (2 + 0.9 \times C_{org}) \quad (\text{Eqn. 5})$$

SN, SP and SK are expressed in kg ha⁻¹ of N, P and K, respectively; N_{tot} and C_{org} in g kg⁻¹; P_{avail} in mg P kg⁻¹ and K_{exch} in mmol⁺ kg⁻¹.

Boundary line models were fitted to the relationship between crop yields and the various explanatory variables analysed (e.g., soil organic C, distance to homestead, etc.) following the method described by Shatar and Mcbratnet, (2004). Statistical analyses (one-way ANOVA) were done by using GenStat 14th edition. Means were compared by the least significant difference (LSD) test at P≤0.05.

3. RESULTS

3.1 Crop yield variability across the landscape and farm types

Figure 7 shows observed crop yields during the 2012 season in Yilou and Koumbia as function of the size of the corresponding fields and their distance to the homestead. Crop productivity levels varied widely between both villages. The relatively higher crop yields in Koumbia were attributable to higher total rainfall and a longer rainy season in Koumbia than in Yilou. Most fields at Yilou were cropped to sorghum, and secondarily to maize, rice and millet, whereas most fields at Koumbia were cropped to maize and cotton, a smaller number to rice and even fewer to sorghum. The average grain yields of maize and sorghum during the 2012 season were respectively 390 ± 170 and 670 ± 220 kg ha⁻¹ at Yilou, and 1580 ± 520 and 350 ± 230 kg ha⁻¹ at Koumbia. Maize at Yilou was restricted to small (< 0.5 ha) fields closest to the homesteads, the so-called ‘village fields’; cotton at Koumbia was mostly cultivated in large fields, so-called ‘bush fields’, away from the homesteads. Rice at both locations was restricted to small fields that could be flooded, close to natural waterways. Most of the ‘close’ or village fields that were smaller than 0.2 -0.5 ha, were cultivated using manual labour, while the larger ‘remote’ or bush fields were cultivated using animal traction.

The distribution of field types – close, mid-distance and remote fields- and their average area and distance from the homesteads are given for both villages in Table 11, from which it is evident that the meaning ascribed to the terms ‘close’ and ‘remote’ is site specific. Koumbia has been recently organised as an agglomeration of homesteads near the main road, with most cropping fields located farther away, especially those of Mossi immigrants.

Grain yields of major crops differed also among farm types (Table 10). At Yilou, sorghum yields were significantly different ($P<0.05$) between agro-pastoralists (T2) and others farm types (subsistence-oriented, market-oriented and off-farm income-oriented crop farmers). In Koumbia, maize yield differences between farm types were statistically significant ($P<0.01$) with pastoralists (T4) attaining the highest yields. This type of farmers recorded also the highest rice and cotton yields. Differences between farm types were attributable to differences in crop management, notably fertilizer use and labour availability for timely planting and weeding.

Table 11: Categorisation of the sampled agricultural fields in the two villages on the basis of their distance to the homesteads.

Village and field type	number	Area (ha)	Distance (km)
Yilou			
Close fields	29	0.6 ± 0.7	0.1 ± 0.1
Mid distance fields	16	0.7 ± 0.8	1.2 ± 0.8
Remote fields	18	1.1 ± 1.2	3.2 ± 0.8
Koumbia			
Close fields	20	1.3 ± 1.3	1.1 ± 0.9
Mid distance fields	16	1.8 ± 1.9	2.8 ± 0.1
Remote fields	24	1.4 ± 1.0	5.5 ± 1.3

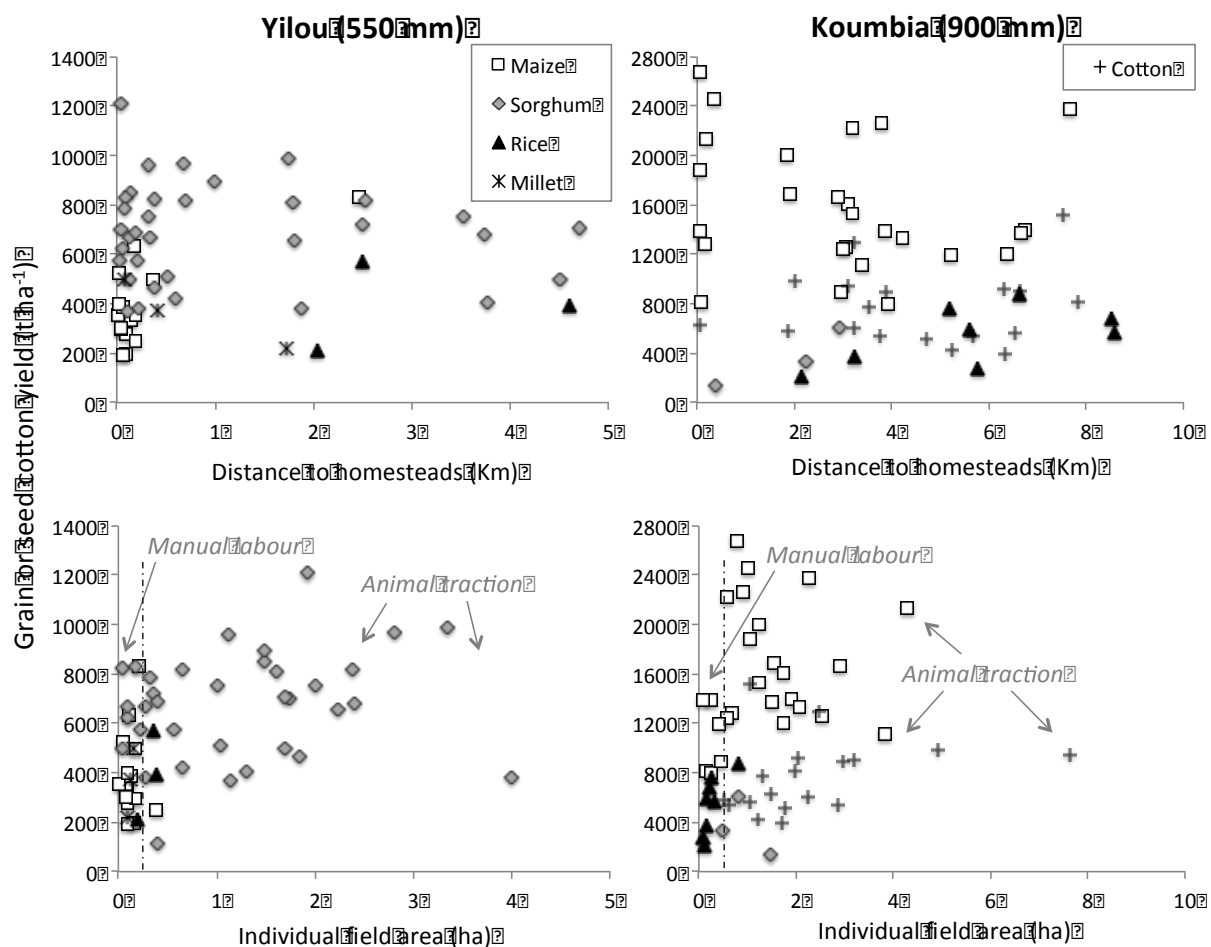


Figure 7: Yields of the major crops cultivated in Yilou and Koumbia villages during 2012 season as a function of the distance from the fields to the homestead (Top) and of the area of each individual field (Bottom). Note that the scale of the axes depicting yields, distance to homestead and field area is different at both sites. The dot-dashed line represents approximately the maximum size of fields that are ploughed by hand. Larger fields are predominantly ploughed using animal traction.

Grain yields of major crops differed also among farm types (Table 12). At Yilou, sorghum yields were significantly different ($P < 0.05$) between agro-pastoralists (T2) and others farm types (subsistence-oriented, market-oriented and off-farm income-oriented crop farmers). In Koumbia, maize yield differences between farm types were statistically significant ($P < 0.01$) with pastoralists (T4) attaining the highest yields. This type of farmers recorded also the highest rice and cotton yields. Differences between farm types were attributable to differences in crop management, notably fertilizer use and labour availability for timely planting and weeding.

Table 12: Average yields (kg ha⁻¹) of the main crops per farm type at both villages during the 2012 season

Village	Farm type	Maize	Sorghum	Rice	Cotton
Yilou	T1	270 ± 86a	620 ± 158a	-	-
	T2	440 ± 169a	860 ± 245b	210 ± 122a	-
	T3	400 ± 114a	670 ± 137a	130 ± 229a	-
	T4	600 ± 337a	490 ± 280a	290 ± 404a	-
	Significance	0.636	0.012	0.232	
Koumbia	T1.	1250 ± 512a	-	550 ± 250a	580 ± 184a
	T2	2300 ± 307b	45 ± 78a	620 ± 83a	990 ± 471a
	T3	1380 ± 378a	-	440 ± 619a	680 ± 219a
	T4	1630 ± 243a	460 ± 194a	290 ± 106a	880 ± 296a
	Significance	0.001	0.400	0.213	0.542

a,b indicate least significant differences between means

3.2 Diversity of nutrient inputs across farm types and the landscape

For all the crops grown at both villages, nutrient inputs in the form of applied mineral and organic fertilizers were on average low and below the rates recommended by the local extension offices (Table 13). Inputs differed largely as a result of the variability between and within individual farms and field (crop) types in the landscape. A relatively large number of fields received no nutrient inputs at all. Maize and cotton received most of the mineral and organic fertilizers in Koumbia, together with other minor cash crops such as vegetables (not shown). At Yilou, both maize and sorghum received mineral and organic fertilizers, albeit at lower rates. Market-oriented farmers (T3) fertilized also rice and vegetables crops (data not shown). It is also important to note that in both villages, farmers who have easy access to animal manure (principally agro-pastoralists (T2) in Yilou and pastoralists (T4) in Koumbia), often kept their animals during the night in fields close to their homestead to profit from the animal faeces. However, this type of nutrient inputs was not considered in the values presented in Table 13.

Table 13 : Average nutrient input (kg ha⁻¹) in the form of mineral and organic fertilisers to maize, sorghum and cotton per farm type and per case study village

Maize, sorghum and cotton per farm type and per case study village							
Village	Farm type	Maize		Sorghum		Cotton	
		Mineral	Organic	Mineral	Organic	Mineral	Organic
Yilou							
N	T1	7.9 ±7.5	33.1 ±21	6.8 ±5.2	7.4 ±5.6	n/a	n/a
	T2	0	19.6 ±18	2.9 ±4.2	20.0 ±20	n/a	n/a
	T3	0	4.3 ±8.1	4.7 ±4.9	8.0 ±26	n/a	n/a
	T4	1.4 ±2.0	0	5.6 ±4.8	5.2 ±11.5	n/a	n/a
P	T1	10.0 ±9.3	10.3 ±10.5	8.5 ±6.5	2.7 ±3.0	n/a	n/a
	T2	0	3.3 ±3.0	3.7 ±5.3	12.1 ±13	n/a	n/a
	T3	0	1.0 ±1.6	5.9 ±6.1	2.1 ±4.3	n/a	n/a
	T4	1.8 ±2.6	0	7.1 ±6.1	3.3 ±7.4	n/a	n/a
K	T1	8.0 ±7.6	29.0 ±21	6.8 ±5.2	7.0 ±5.7	n/a	n/a
	T2	0	14.1 ±13	2.9 ±4.2	24.0 ±25	n/a	n/a
	T3	0	3.8 ±6.2	4.7 ±4.9	8.6 ±18	n/a	n/a
	T4	1.5 ±2.0	0	5.7 ±5.0	6.4 ±14.3	n/a	n/a
Koumbia							
N	T1	41.7 ±19.4	3.4 ±4.6	0	0	28.7 ±5.7	1.8 ±3.2
	T2	30.0 ±21.7	39.2 ±24.1	0	0	34.5 ±5.7	29.0 ±25.9
	T3	43.8 ±13.8	12.7 ±21.0	0	0	34.5 ±19.8	5.8 ±7.8
	T4	50.1 ±27.8	12.4 ±13.8	0	0	33.6 ±9.7	4.6 ±4.8
P	T1	26.2 ±16.5	2.2 ±2.9	0	0	21.9 ±11.4	1.2 ±2.0
	T2	27.7 ±11.1	23.8 ±14.7	0	0	20.3 ±4.2	18.0 ±16
	T3	22.0 ±16.7	6.6 ±12.5	0	0	24.4 ±15.7	3.7 ±5.0
	T4	27.4 ±8.2	7.5 ±7.8	0	0	30.6 ±6.4	0.8 ±0.8
K	T1	15.9 ±10	4.3 ±5.7	0	0	13.3 ±6.9	2.3 ±4.0
	T2	16.9 ±6.8	51.0 ±31.6	0	0	12.3 ±2.5	37.3 ±32.9
	T3	13.4 ±10.2	14.0 ±24.7	0	0	14.8 ±9.6	7.2 ±9.2
	T4	16.7 ±5.0	16.3 ±19	0	0	18.7 ±3.9	3.3 ±3.4

Part of the variability in nutrient inputs was associated with spatial variability, notably with the location of the fields with respect to the homesteads (Figure 8). In Yilou, in particular, application rates of C and organically held nutrients tended to be higher in the fields closest (<0.5 km) to the homesteads. Yet, there are a large number of fields that received no C or nutrient inputs from organic sources (Figure 8). The proportion of fields receiving organic fertilizers was 71, 56 and 10% for the close, mid- and distant fields, and of those that received mineral fertilizers was 40, 61 and 75%, respectively.

Most farmers at Yilou applied greater rates of mineral N, P and K fertilizers to fields located less than 1 km away from the homesteads, except for a few fields located further away that were cropped to vegetables receiving large amounts of compound NPK fertilizers. Especially the low-resource farmers (T1 and T4) applied higher rates of fertilizers to their close fields than to the other fields (see N, P and K application rates per farm type and per field type in Supplementary Materials, Table S1). Gradients of fertilizer use were not evident in case of market-oriented farmers (T3). Average application rates of mineral fertilizer seldom exceeded 50 kg ha⁻¹ N or 30 kg ha⁻¹ P, even when considering market-oriented (T3) farms with their relatively intensive vegetable fields cultivated in the lowlands. The differences in fertilizer application rates from homesteads to distant fields were less pronounced in Koumbia (Figure 8). In general, fertilizer application rates were higher than in Yilou, with maximum rates observed in mid-distance fields located at an average distance of 2.8 km from the homesteads (vs. only 1.2 km at Yilou, Table 13). Farmers at Koumbia had better access to mineral fertilizers due to credit obtained through contract farming of cotton. The spatial organization of the territory in the village of Koumbia differed from the more traditional setting observed at Yilou. As in Yilou, differences were observed in the rate of fertilizers applied to different fields by the various farm types in the village (see Supplementary Materials, Table S1). Agro-pastoralist farms (T2) tended to concentrate mineral and organic fertilizers on their mid-distance and remote fields, because the fields nearby their homesteads receive nutrient inputs through manure of corralled livestock. The other farm types in Koumbia tended to apply similar rates to all their fields, irrespective of their location

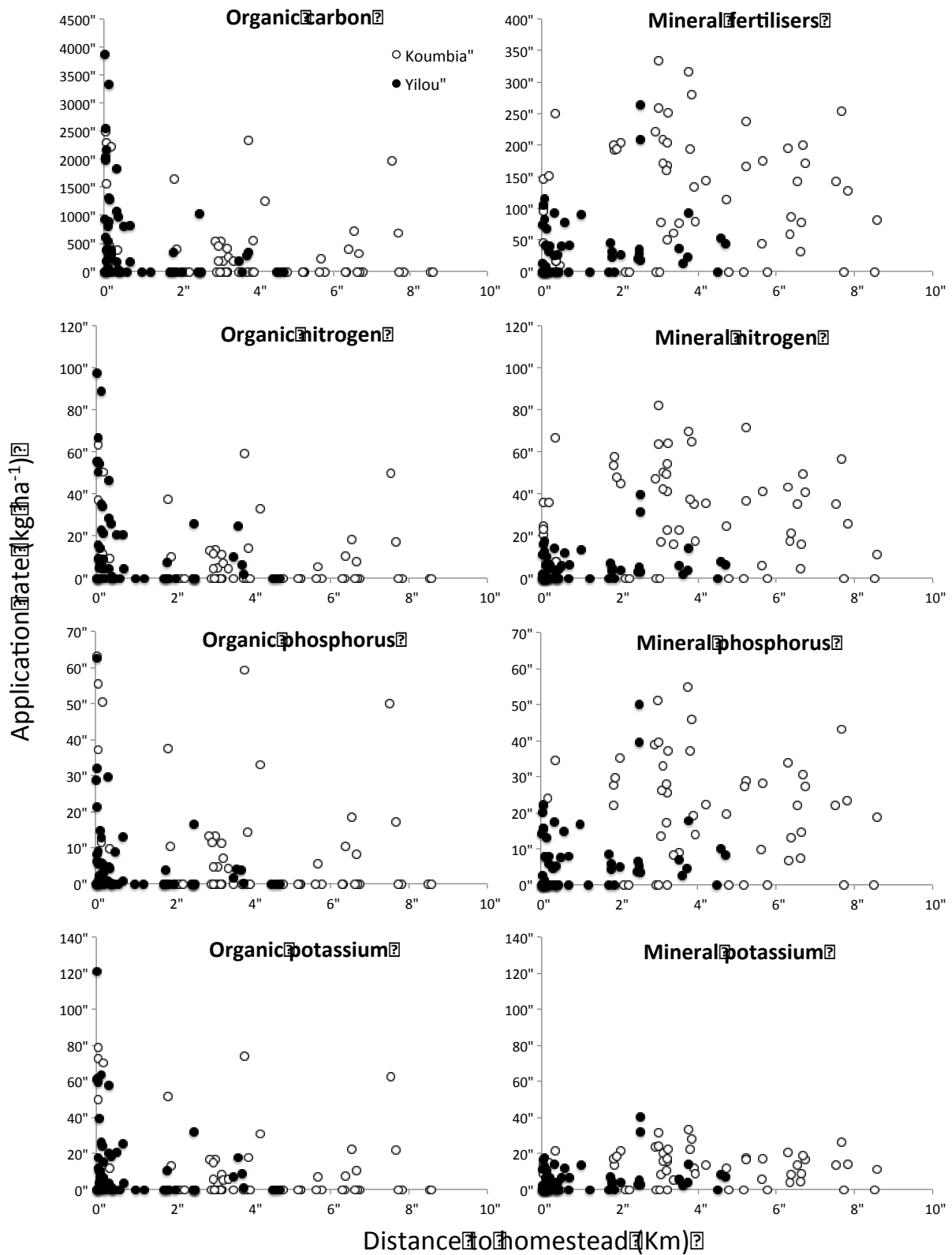


Figure 8: Application rates of organic and mineral fertilizers, and the respective application rates of organically-held and mineral C, N, P and K at increasing distance from the homesteads in Yilou (n = 63) and Koumbia (n = 60) villages.

At both villages, however, the rates of N and K inputs were insufficient to compensate for their respective output rates, leading to negative partial N and K balances in most fields of both villages (Figure 9). Farmers removed more than twice the amount of N and K that they applied in most fields at Yilou, and about 50% more than what they applied in most fields at Koumbia. Partial P balances were positive for most of the monitored fields, and P removal rates were less than half of what farmers applied to most fields at both villages. The majority of fields that exhibited positive N, P and K balances at Yilou were located close to homesteads.

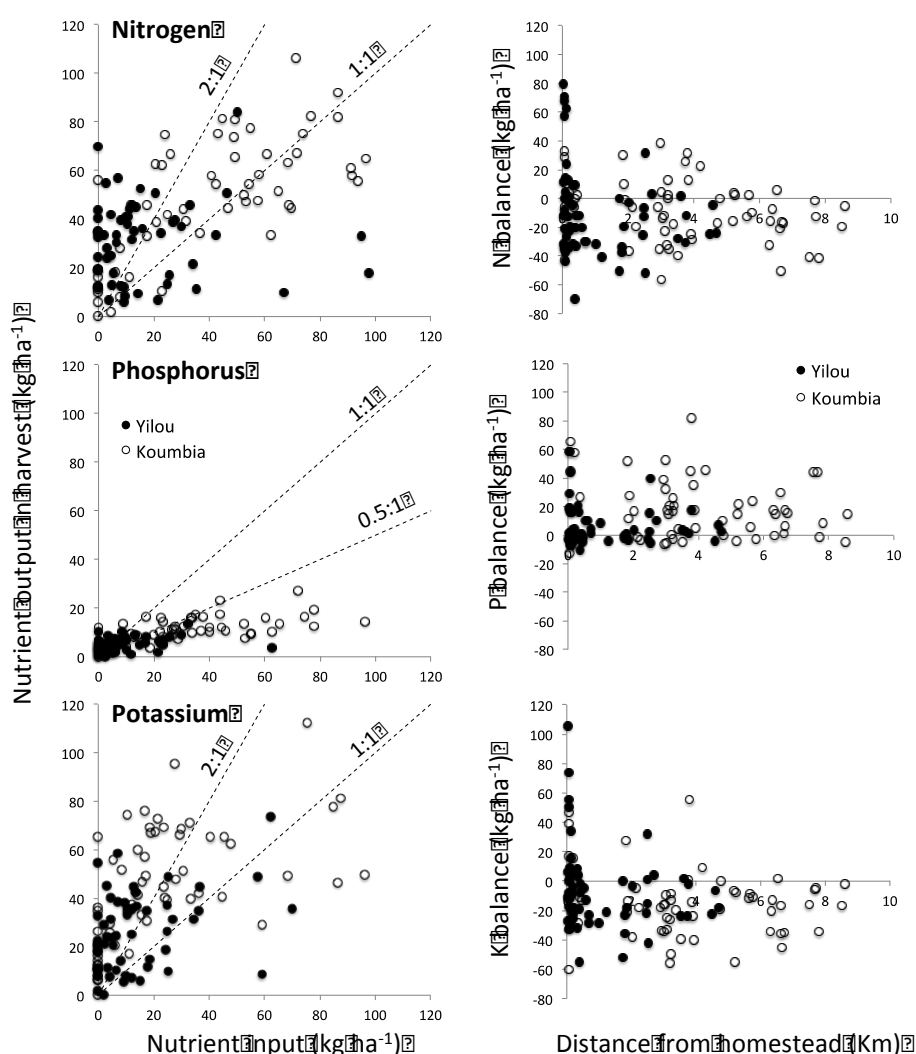


Figure 9: Partial nutrient balances at field scale at Yilou ($n = 63$) and Koumbia ($n = 60$) villages. Left: N, P and K inputs versus their respective outputs in crop harvests (including harvesting of crop residues). Dotted lines indicate one to one, two to one and half to one ratios. Right: N, P and K balances (inputs – outputs) as a function of the distance from the centre of each field to the homesteads.

3.3 Soil variability

In accordance with the results presented so far, soil fertility indicators tended to exhibit more favourable values in the fields located within 0.5 km from the homesteads (Figure 10). This pattern was more pronounced in Yilou than in Koumbia, and more noticeable for available P and exchangeable bases, including K (data not shown), than for soil organic C and total N (data not shown). Most fields at both villages had available P levels below the critical level, often assumed at 10 mg kg^{-1} (Vanlauwe et al., 2006). The pH of the topsoil tended to decrease at increasing distances from the homesteads, and there were about 20% of the fields that exhibited $\text{pH} > 7$, most of them located close to homesteads. Part of the spatial variation in soil available P, exchangeable K and pH can be explained by the use of kitchen ashes to fertilize the fields closest to the homesteads. In our survey, such a practice was observed mostly at Yilou.

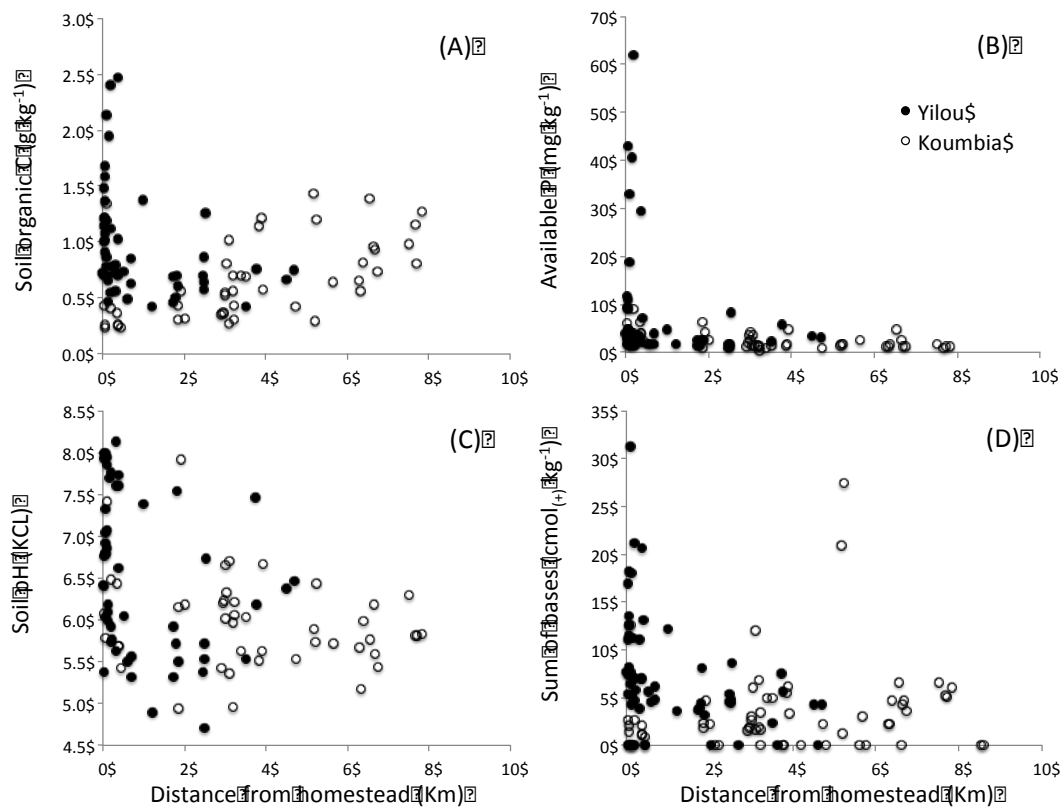


Figure 10: Variation in average soil organic carbon (A), available phosphorus (B), soil pH (C) and sum of exchangeable bases (D) in the topsoil (0-20 cm) of fields located at increasing distance from the homesteads at Yilou (black circles) and Koumbia (white circles).

To investigate whether the spatial variability observed was also the result of inherently different soil types in the landscape, we analysed at both villages the interaction between field types (close, mid- and distant fields) and their position in the landscape (foot slopes, flat plains, upper land). Most of the soil indicators exhibited comparable average values between landscape units (Table 14), and no significant interactions with the distance to the homestead (data not shown). Most fields close to the homesteads, however, were located on the flat plains. This indicates that the trends in soil fertility observed with the distance from homestead (Figure 11) were mainly due to soil management and associated nutrient balances. Due to the wide variability of soil x management situations within each farm type, the average value of soil indicators did not differ significantly per field and farm types, except for soil pH, and the interaction between these factors was not significant (see Supplementary Materials, Table S2 and S3). It should be noted that, although the highest soil indicator values were observed in fields closer to the homesteads, particularly in Yilou, the variation even within this field type was large (Figure 11).

Table 14: Average values of soil fertility indicators per landscape unit at Yilou and Koumbia.

Landscape unit/ soil type [§]	SOC (%)	Total N (‰)	P ^{available} (mg.kg ⁻¹)	Exchangeable bases				pH _{water}
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
Yilou								
Foot slopes	1.05 ±0.6	0.96 ±0.7	8.56 ±12.9	5.91 ±3.6	1.90 ±0.9	0.89 ±0.8	0.05 ±0.03	6.49 ±0.8
Flat plains	1.07 ±0.6	0.99 ±0.7	9.66 ±15.5	7.26 ±5.4	1.79 ±0.9	0.94 ±0.9	0.06 ±0.04	6.81 ±1.0
Upper land	0.79 ±0.3	0.68 ±0.3	4.75 ±5.4	4.71 ±3.4	1.38 ±0.5	0.57 ±0.5	0.06 ±0.04	6.06 ±1.1
Koumbia								
Foot slopes	0.63 ±0.3	0.45 ±0.3	3.71 ±2.5	3.15 ±2.5	0.84 ±0.6	0.28 ±0.1	0.04 ±0.1	6.35 ±0.7
Flat plains	0.71 ±0.4	0.52 ±0.3	2.21 ±1.8	3.09 ±2.9	1.09 ±1.1	0.24 ±0.1	0.03±0.04	5.88 ±0.3
Upper land	0.73 ±0.3	0.52 ±0.2	2.32 ±2.3	2.60 ±1.3	0.83 ±0.4	0.35 ±0.2	0.03 ±0.01	5.85 ±0.5

[§]Soils in the upper lands are coarse sandy soils with presence of laterite gravel, soils on the flat lands are sandy, and soils in the foot slopes towards the lowlands are sandy loams (cf. Figure 1).

3.4 Yield gaps and resource use efficiency

This section focuses on the major cereal crops observed at each location, sorghum at Yilou and maize at Koumbia. These yields were obtained in fields that received combined applications of mineral fertilizers and organic amendments. These yields were far below model-based estimations of yield potentials. For example, the water-limited yield potential of sorghum (hybrids) grown in locations of the Sudano-Sahelian zone with around 500 mm of rainfall was estimated at about 2800 kg ha⁻¹ (Mishra et al. 2008), and that of maize (local varieties) grown in a 800-1000 mm Sudanian rainfall zone at about 6000 kg ha⁻¹ (Siband et al. 1999). Figure 11 A and B show the relationship between sorghum (at Yilou) and maize (at Koumbia) grain yields and the total amount of N applied (in both organic amendment and mineral fertilizers), distinguishing with dark marker colours the fields that received organic amendments. As indicated earlier, total N application rates were higher in Koumbia than in Yilou. Most of the N applied to sorghum at Yilou was done in an organic form or combining organic and mineral fertilizers. When only mineral fertilizers were used, N application rates were lower than 20 kg N ha⁻¹. Maize at Koumbia received up to 75 kg N ha⁻¹ from mineral fertilizers and up to 100 kg N ha⁻¹ in combination with organic amendments.

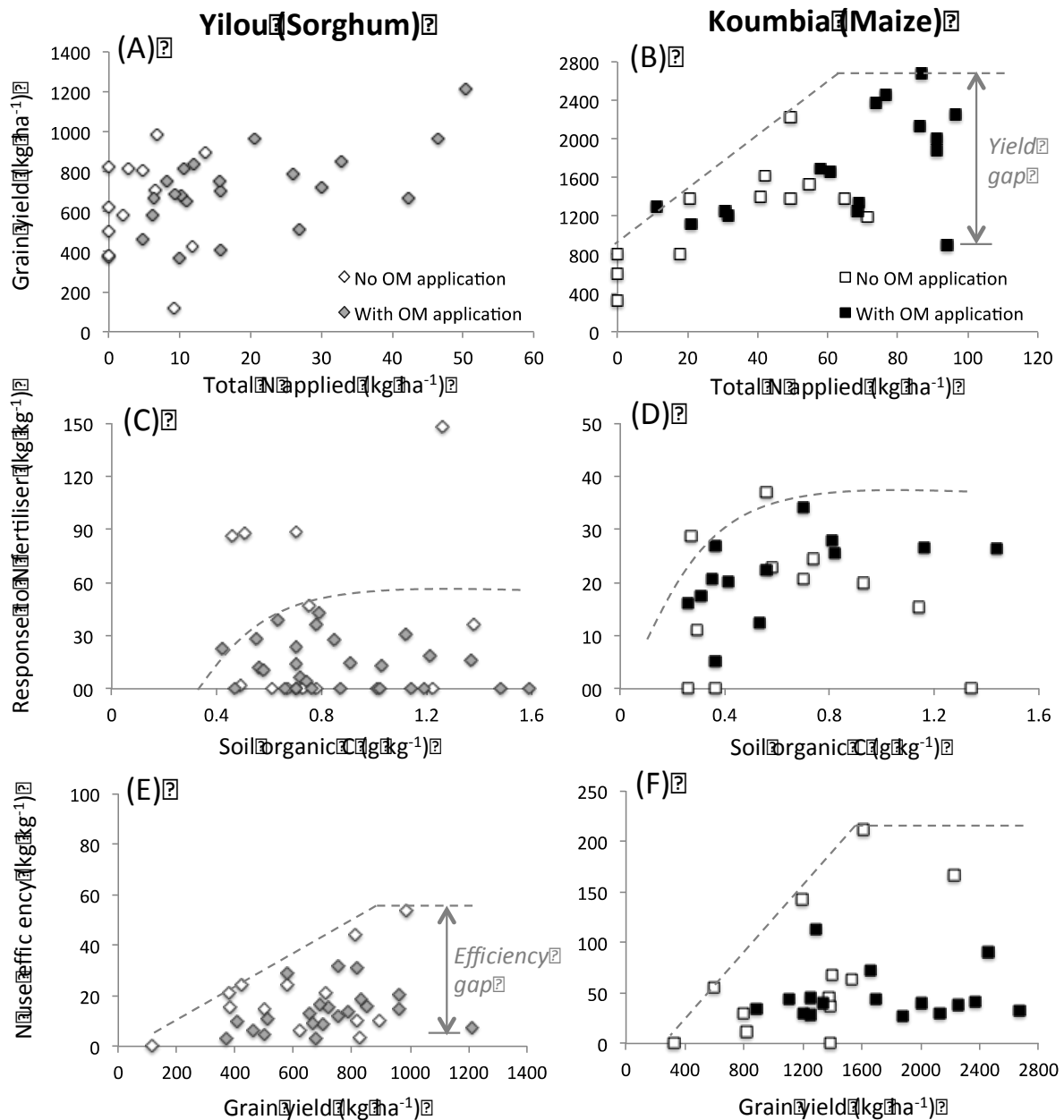


Figure 11: Relationships between grain yield and applied N (A, B), between responses to N fertilizer and soil organic carbon (C, D) and between N use efficiency and grain yield (E, F) for sorghum and maize respectively grown on farmers' fields in Yilou and Koumbia. For explanations see text.

The response to applied N (and also to P and K, data not shown) in organic and mineral fertilizers was greater for maize than for sorghum. Yields of both sorghum and maize fluctuated between 400-800 kg ha^{-1} at both villages when no N was applied. Application of N with organic and mineral fertilizers often doubled maize yields at Koumbia, but only to small increases in a sorghum yield at Yilou (Figure 11 A and B).

The apparent response to mineral fertilizers was calculated (Equation 1) assuming a non-fertilized yield of 400 kg ha⁻¹ at both villages. This led to apparent responses to applied N that were in most cases below 40 kg kg⁻¹, as indicated by the hand-drawn lines in Figure 11 C and D. The somewhat greater apparent response to organic and mineral fertilizers by sorghum is also the result of the lower application rates of N (and P and K) to this crop. Maximum apparent responses to applied P and K were in the order of 65 and 51 kg kg⁻¹ for sorghum at Yilou and of 78 and 76 kg kg⁻¹ for maize at Koumbia (data not shown).

Nutrient use efficiencies were calculated using Equation 2 by relating grain yields to the total amount of nutrients applied plus the calculated native soil nutrient supply (Eqn. 3, 4, and 5). The maximum (95th percentile) N use efficiencies were in the order of 50 kg kg⁻¹ for sorghum at Yilou and of 150 kg kg⁻¹ for maize at Koumbia. Maximum P and K use efficiencies were 120 and 47 kg kg⁻¹ at Yilou and 177 and 91 kg kg⁻¹ at Koumbia, respectively. Nutrient use efficiencies tended to increase as the yields increased (Figure 11 E and F). Yet, a large number of fields exhibited low N use efficiencies at relatively high yields, or wide N use efficiency gaps.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In spite of the observed variability, soil fertility was generally poor and use of nutrient inputs low in most fields of both villages in our study (Figure 11, Table 14), which is a common feature in the Sudano-Sahelian zones of West Africa (Bationo et al., 2007 ; Schlecht et al., 2006). Soils in the region are predominantly sandy, and their low protective capacity of organic matter poses a major limitation for the build-up of soil fertility. Moreover, over the last decades the increasing population pressure in the savannah zones of West Africa has decreased the availability of arable land. As a result, the practice of extended fallow periods to restore soil fertility is no longer feasible (Gray, 1999 ; Ouattara et al., 2006). Continuous crop cultivation with insufficient input rates of nutrients to compensate their respective output rates results in negative (partial) balances of notably N and K (De Ridder et al., 2004 ; Ramisch, 2005) which was observed on the majority of the fields in our study (Figure 11). As a consequence, yields for most crops were low in all fields in both villages of our study (Figure 10, Table 13). Crop yields did, however, differ among farm types, which can be linked to their socioeconomic characteristics that influence soil and crop management strategies.

Several other studies (e.g. Chikowo et al., 2014 ; Gandah et al., 2003 ; La Rovere et al., 2005; Tiftonnell et al. 2005a) have shown that soil fertility management and the use of inputs are strongly related to the degree of access to resources that farmers have (e.g., carts, cattle manure, labour, mineral fertilisers and cash/credit). In the Sudano-Sahelian zones of West-Africa, ownership of cattle is one of the major factors in the maintenance of soil fertility, since it gives access to manure and is a way of concentrating organic matter and nutrients from grasslands to cropland fields (Achard and Banoin, 2003; Diarisso et al., 2014). In both villages of our study, crop farmers (agro-pastoralists), who own a substantial number of livestock and thus have access to manure, used more organic fertilizer on the fields where they grew the major crops (sorghum in Yilou, maize and cotton in Koumbia) than those with few cattle (Table 14). As a consequence, these farmers showed better soil fertility indicators (Table A4 and A5) and crop yields (Table 13). Another important factor in the maintenance of soil fertility is the cultivation of cotton. The credit schemes provided by the cotton company in Koumbia facilitate the access to mineral fertilizer that is not only used for the cotton crop, but also for maize (Table 14). In Koumbia, all farm types cultivated cotton and used similar amounts of mineral fertilizer on both their maize and cotton fields. On a hectare basis, applied amounts of mineral N were even higher on the maize than on the cotton crop. Farmers commonly shift chemical fertilizer received on credit for cotton to maize (Laris et al. 2015).

Manure, including faecal excretions from corralled or grazing animals on fields after harvest, is the most important source of organic matter and nutrients for maintaining soil fertility and enhancing crop yields in the savannah zones of West Africa (Bationo A and Mkwunye, 1991). Organic matter inputs from crops (harvest residues and roots) are generally low due to low productivity and the use of residues for cattle feeding. Apart from being a source of nutrients, organic amendments, especially manure or compost, are also known to enhance crop yield responses to mineral fertilisers (e.g. Bernard Vanlauwe et al., 2010). The sole use of mineral fertilizer on the low-carbon soils of West Africa is often not effective for enhancing crop yields (e.g. Nziguheba et al., 2009). Maximum mineral N use efficiencies observed in our study were in the order of 50 kg grain kg⁻¹ N for sorghum and 150 kg grain kg⁻¹ N for maize. Yet, the average NUEs were much lower (Figure 11 E and F), and wide N use efficiency gaps were revealed between farms. Differential responses to mineral fertilizer can partly be explained by organic matter management and the related soil C content (Figure 11 A-D). Besides, other appropriate agronomic management practices, including best planting densities, timely planting and optimum fertilizer doses can substantially improve NUE (Vanlauwe et al., 2011).

Application of fertilisers differed between fields within their farm and tended to be greater on the fields near their homesteads, especially for the organic fertilisers and in Yilou (Figure 10). Farm types with limited means cannot afford to apply fertilizer on all their fields. Moreover, lack of transport means might be a hindrance for use of manure on distant fields. However, those which better access to mineral fertilizers tend to apply similar rates to all their fields, irrespective of their location. The patterns of varying soil fertility management with increasing distance from the homestead results in gradients of soil fertility, with the most fertile fields located close to the homesteads (Figure 11). This observation is in agreement with those reported for other parts of Africa, e.g. by Hailelassie et al (2007), Masvaya et al., (2009) and Tittonell et al. (2005b). Concentric rings of varying soil fertility around homesteads have been described to be typical of West Africa (Prudencio, 1993). This ring management of crop and soils was, however, not so obvious in our study, especially in Koumbia, and application rates of fertilizers varied not only according to distance from homestead (Figure 11). Types of crop (for cash versus subsistence) and their management also play a major role on soil fertility and yield variation (Table 13). For example, in Koumbia sorghum does not receive any fertilization, whilst in Yilou sorghum, the main food crop, is preferentially fertilized over the maize crop.

The existence of gradients or patchworks of soil fertility gives rise to a wide variation in the response to fertilisers within farmers' fields, as observed in different areas of sub-Saharan Africa (e.g. Vanlauwe et al., 2006 ; Wopereis et al., 2006 ; Zingore et al., 2007). The response to applied inputs or their agronomic use efficiency is likely to increase with increasing soil fertility status (Figure 11 C and D). This has implication for fertilizer management. In general, farmers use fertilizers at the most favorable locations of the farm, i.e., the fertile fields around the homesteads, because the crop responses are expected to be higher on such fields compared to outfields. However, it has also been reported that farmers primarily aim at improving crop yields on spots that are considered degraded and at fighting wind erosion (Schlecht and Buerkert, 2004). A recent analysis of a long-term experiment in the Sudano-Sahelian zone of Mali showed that crops grown on soils with a loamy-sand texture that underwent continuous cropping (cotton, sorghum and groundnut in rotation) without nutrient inputs for 15 years responded positively to mineral fertilizer applications (Ripoche et al., 2014).

Our study indicates that exploitable yield gaps in both villages are substantial and to a large extent related to the low fertility status of soils and sub-optimal fertilizer applications. Technologies that would help farmer build up soil fertility and increase crop yields should overcome constraints such as the shortage of organic resources, the lack of adequate transport means for manure and compost, and financial difficulties in purchasing mineral fertilizers. This means that not only the biophysical aspects of crop production must be considered, but also the resources available to farmers and how they are used.

Technology options include improved management and use of available manure and corraling, the introduction of fodder resources for livestock feeding, intercropping or rotation of cereals with legumes, agroforestry practices with leguminous trees and shrubs, use of fertilizer micro-dosing and water conservation practices including mulching (Kessler et Breman, 1991; Schlecht et al., 2006; Wezel A., 2002). These various options are only viable if they fit the biophysical and socioeconomic contexts of different types of farmers in the region. Increasing internal recycling of nutrients through better integration of livestock and cropping and more efficient use of available manure is the first option for farmers with low resource endowment. For example, compost making and rehabilitation of infertile bush fields with available compost, household wastes or manure need relatively little external capital, and is mainly achieved by more labour input. Continuous application of organic fertilizer, even if in small amounts, would in principle allow building up more balanced soil nutrient stocks and a larger capacity of the soil to retain nutrients (and water) by increasing soil organic matter in the long term. Small amounts of mineral fertilizers through micro-dosing can be used to kick-start soil restoration (Tittonell et al., 2008a). Farmers with few livestock could also invest more in the collection of their crop residues for composting or for use as fodder (for cattle feeding during the dry season) (Andrieu et al., 2014). In this way nutrients are kept on their farms and soil productivity is increased in the long term, although this would reduce fodder supply at the village level, and might exacerbate disputes with livestock owners (Andrieu et al., 2014).

Changes in the traditional practice of communal grazing of harvest residues will require negotiations between the different types of farmers involved. The capital-intensive options (use of mineral fertilizer, fodder production to reduce the need of using cereal crop residues) are primarily an option for the better-resourced farmers, who have substantial earnings from cash crops, can benefit from credit schemes and have good access to markets. Overall, import of external nutrients is necessary to restore the negative nutrient balances.

CHAPITRE 4: EXPLORATION DES SCÉNARIOS D'INTÉGRATION DE L'AGRICULTURE ET DE L'ÉLEVAGE SUR LE FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES AGROPASTORAUX ET LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS DANS LE TERRITOIRE VILLAGEOIS

Exploration des scénarios d'intégration de l'agriculture et de l'élevage sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux et la productivité des sols dans le territoire villageois

1. INTRODUCTION

Du fait de la quasi disparition des pratiques de gestion de la fertilité des sols basées sur la jachère et des contrats de fumure entre détenteurs de troupeaux et cultivateurs, causée par la pression démographique, les résidus de récolte deviennent les principales sources d'entretien de la fertilité des sols dans les territoires villageois d'Afrique de l'Ouest (Dugue et al., 2004 ; Powell et al., 2004). Les apports d'engrais chimiques sur les parcelles cultivées restent limités du fait de la faible trésorerie des producteurs (CEDEAO, 2006).

La mobilisation de résidus de récolte dans ces territoires villageois n'est cependant pas égale pour toutes les exploitations agricoles. En effet, la compétition pour l'usage des résidus de récolte (amendement de sols, fourrage pour les animaux, etc.) et les règles de vaines pâtures (libre pâture des animaux) appliquées dans ces territoires villageois limitent l'accès des exploitations pauvres (sous équipées, sans animaux) à cette ressource. Les résidus de récolte des parcelles des exploitations pauvres sont alors broutés par les animaux des autres exploitations. Tandis que ces dernières accumulent d'importantes quantités de fèces sur leurs parcelles via le parcage de leurs animaux (cf. chapitre 1), les exploitations pauvres voient la fertilité de leurs parcelles baisser progressivement.

Par ailleurs, la variabilité interannuelle du climat impacte négativement sur la production de biomasse et amplifie ces déséquilibres entre les exploitations.

L'amélioration de la fertilité des parcelles dans ce contexte passe par une concertation des parties prenantes de la gestion des ressources agropastorales afin d'aboutir à des accords collectifs permettant de coordonner les flux de biomasses (résidus de culture, fumure organique) à l'échelle du territoire villageois.

Des plateformes d'innovation impliquant la recherche, les producteurs, les autorités traditionnelles et administratives ainsi que le secteur privé ont été mises en place dans le cadre de projets successifs de recherche développement sur l'agroécologie et l'intensification durable des systèmes de production (Vall et al., 2013; Dabire et al, 2013).

Elles visent à favoriser la discussion entre acteurs et expérimenter différentes options techniques innovantes telles que la production de compost, ou l'agriculture de conservation, permettant d'améliorer de façon durable la productivité des systèmes des territoires agropastoraux.

Ces options techniques sont cependant basées sur une appropriation individuelle de l'espace et / ou des résidus de récolte, susceptible d'accroître les tensions entre acteurs au niveau du territoire villageois (Andrieu et al., 2014) .

Un des enjeux pour la recherche est donc de proposer des outils d'aide à la décision pour explorer avec les producteurs des modes de gestion innovants des ressources agropastorales à l'échelle du territoire villageois en vue de limiter ces tensions.

L'usage de modèle comme le multi-agent (Barreteau, 2000 ; Bousquet & Le Page, 2004a ; (Mehdi Saqalli et al., 2010 ; Belaqqiz et al., 2011) à travers notamment la démarche de modélisation d'accompagnement (Collectif ComMod, 2005) peut être une voie pour aboutir à de tels accords collectifs.

Plusieurs modèles multi- agent notamment MIROT (Belem et al., 2006) et CaTMAS (Belem et al., 2011) ont été développés, permettant une analyse des flux de biomasses à l'échelle du territoire villageois. Ces modèles ne prennent pas en compte les interactions entre les différents types d'acteurs à travers notamment les flux de biomasses et de transferts de fertilité via les animaux.

Ce chapitre présente la démarche de construction et d'utilisation du modèle MASTeR (Multi Agent Simulator of Territory Ressource flows) permettant d'analyser les flux de biomasses entre les différents types d'exploitations des territoires villageois pour explorer des modes de gestion innovants des ressources agropastorales à l'échelle du territoire villageois.

Après une présentation de la démarche méthodologique et de la structure du modèle construit, nous analysons un scénario climatique, démographique et d'innovation technique définis avec les acteurs locaux. Nous discutons des perspectives en termes d'évolution du modèle et de son utilisation avec les acteurs des territoires villageois.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODE

2.1 Description de la zone d'étude

Cette étude a été menée dans le village de Koumbia, situé en zone Soudanienne du Burkina Faso. La pluviométrie est uni-modale avec une période humide qui s'étend de juin à septembre et une saison sèche d'octobre à mai. La dernière partie de la saison sèche allant de mars à mai est appelée par les villageois, saison sèche chaude du fait d'une hausse des températures. Généralement à cette période tous les résidus de culture ont été consommés par les animaux et les animaux consomment les stocks fourragers ou partent en transhumance à la recherche d'eau ou de fourrages.

Le système de production dans le village est mixte avec une densité de bétail de 45UBT/km², lié à la culture cotonnière qui permet aux producteurs d'acquérir des bœufs de trait (Table 15). Les cultures céréalières sont essentiellement le maïs et le sorgho. Le village se caractérise par une forte pression agropastorale se traduisant par une compétition pour l'accès aux résidus de cultures. Une plateforme d'innovation a été mise en place dans ce village permettant d'analyser avec les acteurs locaux les conditions de mise en œuvre de l'agriculture de conservation (Dabire Der, 2013).

Table 15 : Principaux caractéristiques du site d'étude

Sites	Koumbia
Pluviométrie (mm/an)	900 (800 – 1100)
Type de sol dominant	Luvisols, Lixisols
Densité de population (habitants/km ²)	60
Groupes ethniques	Bwaba, Mossi, Peulh
Taille de l'exploitation (ha)	4,5 – 10, 2
Principales cultures	Coton, maïs

2.2 Collecte de données et typologie des exploitations

La méthodologie utilisée pour les enquêtes et la quantification des flux de biomasses est finement décrite dans le chapitre 1 de cette thèse. La présente section décrit la méthodologie utilisée pour la collecte de données et la construction de la typologie des exploitations.

Afin de déterminer les éléments du réel à modéliser (principaux flux de biomasses à l'échelle du village et de l'exploitation, les systèmes de culture et d'élevage dominants, les pratiques associées à ces flux) une série de données ont été collectées à l'échelle du territoire villageois et de l'exploitation agricole. Au niveau du territoire villageois un focus groupe a été réalisé avec une quinzaine de producteurs en vue d'identifier la diversité des systèmes de production. Lors de ces focus groupe deux cartes à dire d'acteurs ont été élaborées.

La première, en se basant sur l'axe routier traversant le village avait comme objectif de décrire la localisation des différentes zones d'habitation et les infrastructures socio-sanitaires (école, centre de santé, etc.). La deuxième carte visait à localiser l'espace agropastoral (zone cultivée, les pâturages), les flux opérés dans cet espace et les types de sols du village. La production de biomasses herbacées a été mesurée sur les principaux pâturages identifiés (collines, affleurements rocheux, jachères et bas-fonds) du village.

Au niveau de l'exploitation, des enquêtes individuelles ont été menées auprès 53 producteurs du village en vue de décrire la diversité des types d'exploitations.

Elles ont porté sur les caractéristiques structurelles des exploitations, les pratiques de gestion de la fertilité des sols, d'alimentation des animaux ainsi que l'usage final de la biomasse produite (vente, dons, autoconsommation). Une analyse en composante principale a été menée des variables issues données de ces enquêtes (chapitre 1 de cette thèse) et a permis de déterminer 4 types d'exploitation (Table 16). En vue de décrire plus finement les flux de biomasse à l'échelle du village et au sein de des différents types d'exploitation, douze exploitations dans le village (trois exploitations au sein de chaque type d'exploitation) ont été sélectionnées et ont fait l'objet de suivi et de mesure de flux de biomasses de l'exploitation (flux entrant et sortant de l'exploitation), de sous-systèmes au sein de l'exploitation et de parcelles de l'exploitation.

Table 16: Diversité des types d'exploitations (T1 à T4) à Koumbia et leurs principales caractéristiques socio-économiques (moyennes et écarts types)

Type d'exploitation	Proportion des exploitation (%)	Taille de la famille	Actif	Superficie total (ha)	Bétail (UBT)	Equipement	Revenu non agricole (%)	Culture de rente (ha)*
T1. Producteur d'agriculture d'autosubsistance (SO)	44	6.0 ±3.2	4.5 ±2.6	4.5 ± 2.5	4.3 ±3.5	2 ±0.6	15 ±15	1.8 ± 1.6
T2. Agro-éleveur (AP)	17	21 ±7.5	12 ±5.1	7.8 ± 2.6	17.2 ±3.5	3 ±0.6	10 ±9.0	4.5 ± 0.9
T3. Producteur intégré au marché (MO)	26	9.0 ±2.9	7.0 ±1.1	10 ± 2.6	6.7 ±1.7	3 ±1.0	8 ±10.0	5.9 ± 1.5
T4. Eleveur -agro (PA)	13	23 ±5.8	13 ±4.0	6.9 ± 3.5	58 ±13.7	2 ±1.1	12 ±10	1.6 ± 1.5

*Coton à Koumbia,. UBT : Unite Bétail Tropical. Equipement est la somme du nombre de charrue, de semoirs et de charrette par exploitation

2.3 Processus de développement du modèle multi-agent

2.3.1 Validation des données collectées et discussions des scénarios pré-identifiés

Une réunion a été organisée avec les producteurs des villages de Koumbia avec comme objectif de valider les résultats des enquêtes et des mesures de flux de biomasses et d'identifier avec eux différents scénarios prospectifs à l'échelle du territoire villageois. La réunion a regroupé dans le village de Koumbia dix agriculteurs et six éleveurs. La plateforme d'innovation entre la recherche - producteurs du village a servi de cadre pour les échanges.

Les systèmes de cultures et d'élevage, la typologie des exploitations, la gestion des résidus de récoltes, les flux de biomasses entre les différents types d'exploitations et le modèle conceptuel des systèmes de cultures et d'élevage du village ont été présentés pour validation.

Pour engager la discussion sur les scénarios prospectifs à l'échelle du territoire villageois deux types de scénarios ont également été présentés aux producteurs : (i) un scénario climatique caractérisé par une baisse de 25 % de la pluviométrie saisonnière par rapport à celle observée dans le village d'étude compte tenu des prévisions de baisse de la pluviométrie pour l'Afrique de l'Ouest dans plusieurs scénarios climatiques (Boubacar Ibrahim et al., 2013) (ii) un scénario technique, pour lequel on teste l'introduction de l'agriculture de conservation pour son potentiel pour améliorer la fertilité des sols (Baudron et al., 2009 ; Naudin et al., 2010).

Pour le scénario climatique, nous faisons l'hypothèse que la baisse de 25 % de la pluviométrie entraîne une baisse de rendement de base du maïs (rendement sans apports de fertilisants minéraux et organiques) de 75 %, le calcul de rendement dans le modèle à son stade de développement actuel ne tenant pas compte de la pluviométrie. Pour le scénario technique, nous avons proposé aux producteurs que chaque type d'exploitation consacre 30 % de sa superficie cultivable à l'agriculture de conservation (AC).

Nous faisons l'hypothèse que la conversion d'une parcelle en AC augmente la productivité de céréale (maïs) de 10 % (Corbeels, communication personnelle, 2014) et que la production de paille n'est plus accessible au pâturage. Ces scénarios, climatique et technique ont pour but d'explorer respectivement les effets de changements techniques ou de l'environnement de production sur la production de grains, la production de fumure organique et sur l'évolution de la fertilité des parcelles. Après chaque exposé, les participants à la réunion étaient invités à donner leurs perceptions sur les résultats des enquêtes et à réagir sur l'intérêt et la faisabilité des scénarios pré-identifiés. La parole était donnée à tour de rôle aux différents participants. L'ensemble des remarques et suggestions sur les présentations était pris en compte pour la construction du modèle conceptuel et pour fixer les variables des scénarios à tester dans le modèle multi-agent. Ainsi, globalement le système d'élevage présenté aux producteurs a été validé, il y avait en revanche un désaccord sur la date estimée de retour des animaux sur les parcelles récoltées en vue de consommer la paille pour fin septembre - début octobre. Les discussions ont montré que ce retour est plutôt étalé courant octobre pour être vraiment effectif fin octobre - début novembre à cause des retards des récoltes de maïs et du coton.

Pour le scénario technique (AC), les producteurs ont trouvé qu'une introduction de l'AC sur 30 % du territoire d'exploitation est assez peu réalisable à cause notamment des contraintes de main d'œuvre pour la collecte suffisante de paille et pour la gestion d'alimentation des animaux dans le village. Le taux de 10 % a été jugé plus réaliste.

Nous avons néanmoins décidé de simuler trois scénarios avec le modèle :

- un scénario climatique avec une baisse de 25 % de la pluviométrie saisonnière observée dans le village d'étude ;
- un scénario avec introduction de l'AC sur 10 % du territoire comme suggéré par les producteurs;
- un scénario avec introduction de l'AC sur 30 % du territoire afin de tester une introduction de l'AC plus ambitieuse bien que plus irréaliste selon les producteurs, la simulation pouvant nous permettre d'analyser la faisabilité de ce taux d'adoption.

Outre la discussion sur le réalisme des scénarios, il a été également demandé aux producteurs d'estimer l'effet potentiels de ces différents scénarios tels qu'ils le perçoivent sur les principales sorties du modèle en vue de comparer les sorties du modèle à ces estimations.

2.3.2 Construction des modèles multi-agents

Des modèles conceptuels décrivant le système de production validé par les producteurs ont été conçus pour chaque village. Les formalismes du langage UML (Unified Modeling Language) à travers le logiciel magic draw (<http://www.nomagic.com>) ont été utilisés pour construire le modèle conceptuel : le diagramme de classes (Figure 12) qui donne une vue statique de l'ensemble du système tout en spécifiant les relations existantes entre les différents systèmes et éléments au sein de chaque système. Le modèle conceptuel a servi par la suite comme référence pour la programmation du modèle multi-agent (Ferber, 1995 ; Bousquet & LePage, 2004), sous la plateforme de simulation CORMAS (Common-Pool Resource and Multi-Agent System, Bousquet et al., 1998). L'appui en programmation informatique de l'unité de recherche Green du CIRAD a été nécessaire pour construire le prototype 1 du modèle multi-agent.

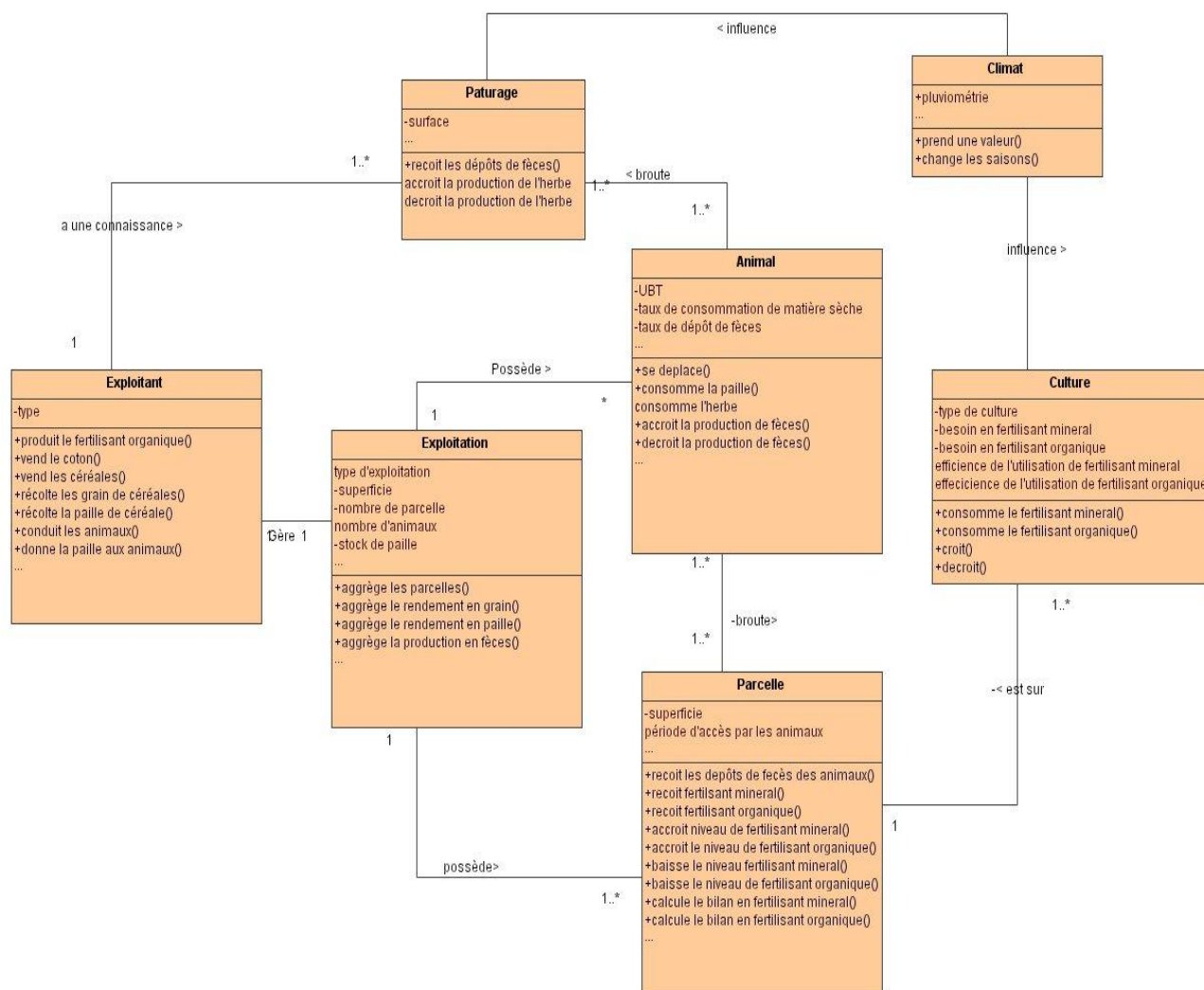


Figure 12 : Diagramme de classe du système de production du village de Koumbia.

2.4 Simulation avec le modèle MASTeR

Pour les scénarios climatiques et d'innovation technique, les productions de grain de maïs et de fumure organique animale, et l'évolution de la fertilité du sol ont été simulées pour une période de 5 ans puisqu' au-delà de cette période on peut faire l'hypothèse que les stratégies des producteurs peuvent évoluer hors dans le modèle MASTeR, les stratégies simulées sont le reflet de celles identifiées par l'enquête. La performance du modèle MASTeR a été évaluée en comparant les sorties simulées par ce modèle à celles observées sur le terrain (données de l'enquête) de l'échelle du territoire villageois et de l'exploitation agricole.

3. RÉSULTATS

3.1 Description du modèle mutli-agent

La description ci-dessous du modèle multi-agents construit s'appuie sur le protocole ODD (Overview, design concepts and details,) proposé par Grimm et al. (2010).

3.1.1 Objectif du modèle

Le modèle MASTeR (Multi Agent Simulator of Territory Ressource flows) a été construit dans l'objectif d'analyser les flux ressources (fumure organique, minérale et résidus de cultures) entre les différentes entités spatiales (zones de pâturage et zones de cultures) et entre les différents types d'exploitations du territoire villageois en vue de tester différents scénarios prospectifs à l'échelle du territoire villageois.

3.1.2 Entités, variables d'état et échelles

Trois types d'entités sont représentés dans le modèle :

- le climat est décrit par trois types de pluviométrie saisonnière (faible, normale et bonne) et deux saisons, une saison pluvieuse du 1er juin au 31 octobre et une sèche du 1er novembre au 31 mai ;
- les animaux sont décrits par deux types (bœufs de trait et d'élevage) qui se différencient par leurs déplacements saisonniers (entre les aires de pâturage et de croissance de culture). Chaque animal (converti en UBT) a un besoin journalier de fourrage et une production journalière de déjections ;
- les unités spatiales au nombre de cinq structurent le modèle :
 - la parcelle est l'équivalent d'une cellule de la grille. Elle constitue l'unité de base dans le modèle. Elle est caractérisée par une superficie, une localisation et un type de couverture (cultures, herbes) ;
 - l'exploitation qui est caractérisée par une aire gérée par le chef d'exploitation. L'exploitation est une unité spatiale agrégeant les parcelles, les animaux et les productions en biomasses (grain, paille, déjections des animaux), mais c'est aussi une entité décisionnelle gérant le confiage (pratique traditionnelle consistant à confier les animaux de l'exploitation à un autre type de d'exploitation durant toute ou partie de l'année) et les déplacements d'animaux, les apports de fertilisants par parcelle, le niveau de récolte des résidus de cultures. Au sein de l'exploitation se trouve l'habitat,

la résidence de l'exploitant, la zone d'accueil des animaux et le lieu de stockage des déjections. Les quatre types d'exploitations rencontrées dans les villages sont représentés (Table 16) ;

- l'espace de cultures est une aire destinée à la conduite des différentes cultures. Il est caractérisé par un assemblage de parcelles (qui peuvent être mises en culture ou laissées en jachère), par une localisation et par un niveau de production de biomasse (biomasse pouvant être grain, paille ou herbe, si la parcelle est en jachère) ;
- le pâturage est une aire où sont alimentés voire parqués les animaux du village. Il s'agit d'une agrégation de parcelles. Il est caractérisé par une superficie, une localisation, un type de biomasse (herbacée), un niveau de production et une période d'accessibilité.

3.1.3 Vue d'ensemble du processus et succession d'actions

Le Climat fixe le début et la fin de la saison humide et la saison sèche, et influe sur les processus biophysiques (la production de fèces et la croissance des biomasses) et décisionnels (les mouvements des animaux, les apports de fertilisants et les récoltes de biomasses) dans le modèle. Durant la saison humide, les parcelles agricoles sont mises en culture et une production de biomasse est simulée en fonction du type de pluviométrie saisonnière et des apports de fertilisants minéraux et organiques associés au type de producteur. Les animaux d'élevage sont affectés au pâturage jusqu'à la fin de la saison humide. Les bœufs de trait eux sont conservés sur l'exploitation et alimentés sur les jachères de l'aire de culture. Les animaux (tous types) produisent des déjections le jour sur les parcelles (aire de cultures ou pâturage), et la nuit sur les parcs situés dans l'exploitation ou les parcs situés dans le pâturage, leur localisation dépendant du type d'animal.

En saison sèche froide des stocks fourragers sont réalisés à partir spécifiquement des pailles de céréales produites en saison humide sur l'aire de cultures. Les animaux quittent le pâturage et sont affectés sur l'aire de cultures. Ils se déplacent aléatoirement et consomment les résidus de culture le jour, et la nuit dorment dans les parcs situés à la ferme (exploitation).

L'épuisement de la paille de céréales sur les parcelles récoltées indique le début de la saison sèche chaude. Les animaux (sans exception) commencent à s'alimenter à partir des stocks fourragers. Une fois la totalité de stocks fourragers consommés par les animaux, ils sont amenés hors du territoire (sortent de la simulation).

Le bilan des apports (apports de fumure réalisés par l'exploitation et par les animaux lorsqu'ils s'alimentent) et des exports (prélèvements faits par la culture pour sa croissance) en azote de chaque parcelle sur l'aire de cultures est effectué par le modèle, l'azote étant pris comme indicateur de fertilité. Une mise à jour de la teneur en azote de chaque parcelle de l'aire de culture est réalisée au début de chaque campagne de saison humide.

Le pas de temps dans le modèle équivaut à une demi-journée. La simulation est annuelle (une année étant composée de deux saisons) avec possibilité de réaliser des simulations pluriannuelles. Le déplacement des animaux et la production des déjections associés sont simulés à la demi-journée pour tenir compte de leurs déplacements.

3.1.4 Conception

Principe de base

Le modèle a été conçu pour une analyse des flux de biomasses et d'azote entre les différentes entités (pâturage et aire de cultures) et entre les différents types d'exploitations du territoire villageois. L'animal joue un rôle essentiel dans le transfert de nutriments notamment l'azote, entre et au sein des différentes entités. Il consomme la biomasse sur certaines parcelles (dans le pâturage et dans l'aire de culture, chez certains types d'exploitations) et dépose la fumure organique dans les parcs de l'exploitation (situés à la ferme ou dans le pâturage). A chaque exploitation est associée un certain nombre d'animaux et de parcelles (en fonction de données réelles d'enquêtes). Les sorties de simulation du modèle sous forme de séries de données sont exportées sous Excel où des graphes peuvent être réalisés.

Apparition

Le concept d'apparition désigne les principales sorties du modèle susceptibles de varier avec le changement de l'environnement de simulation. Dans le modèle MASTeR, la sortie clé attendue est la productivité de la parcelle cultivée. La productivité d'une parcelle est fonction de sa teneur en azote. Cette dernière varie avec l'azote apporté par le producteur et par les animaux pendant qu'ils broutent la paille, ainsi que l'azote exporté par les cultures pour leurs croissances. Une mise à niveau de la teneur en azote de chaque parcelle de l'aire de cultures est faite dans le modèle en fonction de cette dynamique et définit la productivité ultérieure de la culture sur la parcelle.

Adaptation

L'adaptation est le changement opéré notamment par un agent en réponse au changement de l'environnement de simulation. Dans le modèle MASTeR, une variation de la pluviométrie affecte les processus biophysiques (la production de fèces et la croissance des biomasses) et décisionnels (les stratégies d'alimentation, apports de fertilisants et stockage de biomasses) de chaque type d'exploitation. Les stratégies adaptées par chaque type d'exploitation sont alors observés en détail durant les simulations avec le modèle.

Détection

La détection est définie comme le niveau de connaissance de l'environnement de simulation par les agents dans le modèle. L'animal adapte son comportement (déplacement, alimentation) selon la situation et la saison de l'année. Il connaît les parcs de nuit de l'exploitation auquel il est associé et sur lesquels il dépose les fèces. Il a une certaine connaissance de la position, de l'étendue et de la période d'accessibilité à des entités notamment le pâturage et l'aire de cultures du territoire villageois. Il a une perception de l'évolution du disponible en herbacée sur le pâturage ou en paille de céréales sur l'aire de culture. Il connaît son seuil minimum de satiété et part en transhumance si le disponible en biomasses est en dessous de ce seuil.

Interaction

Le modèle simule les interactions entre les différents types d'exploitations agricoles au sein d'un territoire villageois. Les interactions simulées sont de type indirect via une compétition pour l'accès à une ressource commune à chaque type d'exploitation. L'animal joue un rôle primordial dans ces interactions. Il consomme la biomasse (paille de céréales) sur les parcelles d'une exploitation et dépose les fèces dans le parc de nuit de l'exploitation auquel il appartient. Une exploitation ayant des effectifs d'animaux importants accumule ainsi d'importantes quantités de fèces.

Stochastique

La version actuelle du modèle MASTeR est de manière globale déterministe. Toutefois, la modélisation du déplacement des animaux sur le pâturage et sur l'aire de cultures est aléatoire. Les animaux se déplacent au hasard sur l'étendue de ces aires de broutage de sorte à éviter un attroupement sur certaines parcelles pendant que d'autres sont inoccupées.

3.1.5 Initialisation

La simulation débute le 1er juin, au début de la saison des pluies. A l'état initial, le territoire villageois modélisé est composé de 900 ha dont 7 % en pâturage, 85 % en aire de cultures, 5 % en forêt classée et 3 % en zone d'habitation, routes et barrage de retenue d'eau (conformément aux données des enquêtes sur le terrain). La quantité de pluie moyenne est fixée à 900 mm. Cent exploitations agricoles composées de quatre types d'exploitation et dans les proportions observées dans le territoire villageois, sont simulés dans le modèle (Table 17). Une seule culture, le maïs, est simulée dans la version actuelle du modèle. Les paramètres initiaux utilisés pour les quatre types d'exploitation et pour la culture du maïs sont présentés dans les tables 17 et 18. Certains des paramètres du tableau 3 notamment les apports d'azote organique et les stocks de fourrage évoluent au cours des simulations. L'animal (converti en unité de bétail tropical correspondant à un animal de 250 kg, UBT) consomme 6,25kg de matière sèche et dépose 2,8 kg de fèces par jour (Landais & Lhoste, 1993 ; Defoer et al., 1998).

Table 17 : Paramètres initiaux pour les quatre types de producteurs

Type	N	Superficie cultivable de l'exploitation (ha)	Parc de ferme	Parc de pâturage	UBT min-max	Confiage	Apport N organique (kg/ha)	Apport N minéral (kg/ha)	Stock fourrager (%)
SO	44	4	Oui	Non	2-5	Non	3	51	31
AP	17	8	Oui	Oui	12-20	Non	13	31	54
MO	26	10	Oui	Non	4-8	Oui	12	45	29
PA	13	6	Oui	Oui	50-60	Non	39	45	100

SO : Producteur d'agriculture d'autosubsistance; AP : Agro-eleveur ; PA : Eleveur -agro ; MO : Producteur intégré au marché

Table 18 : Valeur des paramètres de la culture du maïs

Rendement de base (sans apport de fertilisants) (kg/ha)	Rapport grain paille	Efficience agronomique de l'azote (kg/ha/kgN)	Efficience de l'utilisation de l'eau de pluie (kg/ha/mm)	Consommation d'azote par le grain (kg/kgN)	Consommation d'azote par la paille (kg/kgN)
400	1.4	14	0.44	0.0171	0.0119

3.1.5 Sources de données

Les données utilisées pour initialiser le modèle (section 2.4.5) sont issues de différentes sources. Les données de caractérisation des systèmes de production et de catégorisation des types d'exploitations sont issues des enquêtes menées dans le territoire villageois.

Les données sur la pluviométrie et les paramètres de consommation et de production de matières sèches par les animaux proviennent de la littérature (Defoer et al., 1998; Blanchard M. & Vall, 2005).

3.1.6 Les sous-modèles

Le climat

Il met à la disposition de la classe parcelle les données de pluviométrie saisonnière et permet de déclencher le début et la fin des différentes saisons.

Pâturage

L'herbe dans le pâturage ne croît pas en fonction de niveau de pluviométrie dans la version actuelle du modèle. On a considéré que le stock d'herbe dans le pâturage en saison humide ne constitue pas une contrainte pour l'alimentation des animaux (Vall & Diallo, 2009). En saison sèche, le stock de l'herbe dans le pâturage est considérablement réduit. Ce stock d'herbe réduit est en dessous du seuil de satiété d'un UBT estimé à 0,72 kg de matière sèche par jour (Vall, communication personnelle, 2014).

Parcelle

A l'échelle de la parcelle est simulée la dynamique de la fertilité et de la croissance du maïs. La fertilité de la parcelle est fonction de son historique (apports fertilisants antérieurs). Cette dernière elle est dans le modèle fonction : (i) de la valeur l'année précédente, (ii) de l'apport direct en azote par les déjections des animaux qui séjournent sur la parcelle pendant la journée, (iii) de l'apport en azote par la fumure organique et minérale épandue par l'agriculteur une fois par an (poudrette de parcs, compost ou fumier, NPK, urée), (iv) de l'export d'azote lié à la récolte de grain et de résidus de récoltes.

La fertilité de la parcelle est déterminée selon les équations 1 et 2 ci-dessous :

$$\text{Fertilité} = \text{CoefFert} * ((\text{MinN} + \text{Org N}) / \text{ConsN}) \quad (\text{eq. 1})$$

$$\text{ConsN} = ((\text{RdtG} * \text{CGA})/100) + ((\text{RdtP} * \text{CPA})/100) \quad (\text{eq. 2})$$

Avec

- Fertilité, Fertilité de la parcelle
- CoefFert, Coefficient de fertilité de la parcelle qui est à 1
- MinN, Quantité d'azote minérale apportée sur la parcelle (kg/ha)
- OrgN, Quantité d'azote organique apportée sur la parcelle (kg/ha)
- ConsN, Quantité d'azote consommée par la culture (kg/ha)
- RdtG, rendement grain de maïs (kg/ha)
- CGA, Coefficient de conversion de grain en azote (%)
- CPA, Coefficient de conversion de paille en azote (%)

La fertilité de chaque parcelle sur l'aire de culture est déterminée au début de chaque campagne de saison pluvieuse selon l'équation 3 :

Le rendement de maïs et de la paille d'une parcelle ont obtenus selon les équations suivantes :

$$\text{RdtG} = \text{RdtBase} * \text{fertilité} + (\text{MinN} + \text{OrgN}) * \text{NAE} \quad (\text{eq.3})$$

$$\text{RdtPaille} = \text{RdtG} / \text{RGP} \quad (\text{eq.4})$$

Avec :

- NAE, Efficience d'assimilation de l'azote (kg/ha/kgN)
- RdtBase, rendement de base de la zone d'étude pour le maïs sans apports de fertilisants minéraux et organiques (kg/ha).
- RGP, Rapport grain : paille

La biomasse produite évolue en fonction des récoltes de l'exploitant (grain et stock fourrager) et des prélèvements de résidus de récolte par les animaux sur la parcelle.

Les animaux

C'est à ce niveau que sont simulés les mouvements des animaux, la consommation et la production de fèces comme observés dans le territoire villageois de l'étude. Dans le modèle les instructions et paramètres suivants sont définis pour un animal. La consommation de l'animal est fonction de son taux de prélèvement et de la quantité de biomasse disponible. Le taux maximal de prélèvement journalier par animal est fixé à 6,25 kg de matière sèche (Defoer et al., 1998). La production de fèces d'un animal est étroitement liée à la quantité de biomasse consommée. Cette production de fèces n'excède pas le seuil maximum fixée dans le modèle, qui est égal de 2,8 kg de fèces par jour (Landaïs & Lhoste, 1993 ; Defoer et al., 1998). La quantité de fèces produit par un animal est un peu plus importante le jour que la nuit. La production de fèces de jour représente 57 % de la production journalière contre 43 % de nuit (Rufino et al., 2006).

Les mouvements, la consommation de biomasses et la production de fèces par les animaux sont simulées dans le modèle selon les saisons. En saison humide, les animaux (bœuf d'élevage) sont affectés sur le pâturage du village. Les animaux de type d'exploitation MO, (exploitation intégré au marché), sont confiés aux pasteurs (type d'exploitation Eleveur - agriculteur).

Durant cette période, les pasteurs bénéficient de la production en fèces des animaux qui leurs sont confiés. Les animaux de trait, notamment ceux de SO (producteur d'agriculture de subsistance) alimentés sur des parcelles non emblavées de l'aire de cultures restent dans les exploitations.

Durant la journée, les animaux se déplacent dans le pâturage ou sur les parcelles non emblavées de l'aire de cultures. Leurs déplacements sur ces aires de broutage se font de manière aléatoire.

Le dépôt de fèces dans la journée sur le pâturage n'est pas simulé pour la saison humide dans la version actuelle du modèle du fait qu'ils ne sont pas collectés par les exploitations (observations issues des enquêtes sur le terrain). La nuit, les animaux dorment dans les parcs de nuit de pâturage ou dans les parcs de ferme pour ceux restés dans les exploitations. Une partie de la fumure organique produite durant la saison humide (production nocturne) y est alors accumulée.

En saison sèche froide et juste après la récolte (grain et une partie de paille), tous les animaux occupent les parcelles récoltées de l'aire de cultures pour consommer les résidus de cultures dans la journée. Leurs déplacements s'y font aussi de manière aléatoire.

Un animal peut se déplacer sur plusieurs parcelles durant une même journée en fonction de la biomasse disponible. Durant ces déplacements et consommation dans la journée, ils déposent une partie de fèces sur les parcelles récoltées. La nuit, les animaux retournent dans l'exploitation de leurs propriétaires. Ils sont stabilisés dans le parc de ferme et produisent des fèces, en quantité plus importante que celle déposée dans la journée.

Le début de la saison sèche chaude est enclenché dans le modèle lorsque la paille disponible sur l'aire culture est inférieure au seuil de satiété des animaux. Ce seuil est estimé à 0,72 kg de matière sèche par jour. En dessous de ce seuil on estime que les besoins physiologiques de l'animal sont inhibés. Les animaux sont maintenant alimentés par les stocks en paille constitués par les différents types d'exploitation. Tous les animaux sans distinction reçoivent la paille issue du stock fourrager. Lorsque le stock fourrager est totalement distribué (disponible en stock fourrager inférieur au seuil de satiété), les animaux partent en transhumance (disparaissent temporairement de la simulation, ils reviendront au début de la saison des pluies suivantes).

L'exploitation

L'entité exploitation rassemble les données sur la production de la culture (grain et en paille), les dépôts de fèces sur parcelles, la production de fèces dans les parcs de nuit (pâturage et ferme). Quatre types d'exploitation avec leurs stratégies de gestion des cultures et des animaux observés dans le village de Koumbia, sont définis dans le modèle (Table 17).

3.2 Résultats des simulations

3.2.1 Estimations par les producteurs des résultats de simulation

En général les producteurs s'attendent à des baisses de la productivité de maïs (PM), de la production de fumure organique (PF) et de la fertilité du sol (FS) dans le territoire villageois avec les scénarios présentés mais ont du mal à les estimer finement (Table 19).

Table 19 : Estimations des producteurs sur l'effet des scénarios, climatique et d'innovation technique

Indicateurs	SC1	SC2
Productivité de maïs PM	- 25 %	-50 à - 25 %
Fertilité de sol FS	-25 %	-25 %
Production de fumure organique PF	-50 à - 25 %	-50 à - 25 %

SC1 : scénario climatique ; SC2 : scénario d'option technique (10 %) .

3.2.2 Tendances entre types d'exploitation simulées pour le scénario de référence

Les tendances des productions (Table 20) en grain et en fumure organique animale observées sur le terrain à partir de nos données d'enquêtes auprès des quatre types d'exploitation agricoles sont simulées par le modèle à savoir que le type PA est celui produisant le plus de grain et de fumure et inversement pour le type SO. La fumure organique animale pour le type MO est toutefois assez proche de celle simulée pour le type SO.

Table 20 : Tendances de données issues de l'enquête de terrain et de celles simulées avec le modèle MASTeR (Scénario de référence) pour les quatre types d'exploitation agricoles

Type d'exploitation	Production de grain de l'exploitation observée sur le terrain (kg)	Production de grain à l'ha, simulée dans avec le modèle (kg)	Production de FO à l'échelle de l'exploitation observée sur le terrain (kg)	Production de FO à l'échelle de l'exploitation simulée avec le modèle (kg)
SO	3203 ±1811	5053 ±1905	1388 ±338	2106 ±552
AP	4391 ±1637	7949 ±1348	5237 ±2860	8751 ±1330
MO	5973 ±1679	10678 ±1662	2604 ±1033	2247 ±489
PA	7021 ±5899	11035 ±2941	10931 ±2645	30570 ±2866

FO= fumure organique animale

3.2.3 Simulation à l'échelle du territoire villageois

Productions de grain de maïs et de la fumure organique animale

Dans le scénario climatique, la baisse de productions de grain de maïs est importante les deux premières années de simulations (7 % et 4 %) puis se rapproche de l'état de référence à partir de la troisième année (Figure 13 A). La production en grain augmente de 5 % et 6 % en première année avec les scénarios d'innovation technique avec 10 % et 30 % d'introduction de l'agriculture de conservation (AC) par rapport au scénario de référence. A partir de la deuxième année de simulations, la production de grain diminue dans le scénario d'innovation technique avec 10 % AC mais reste au scénario de référence (autour de 1 %).

Dans le scénario d'innovation technique avec 30 % AC, il y a une baisse croissante de production de grain de maïs (4 % en 5^{ème} année de simulations).

La production de fumure organique animale a baissé dans les scénarios, climatique et d'innovation technique (Figure 13 B). En considérant uniquement les deux premières années de simulations, le scénario climatique a occasionné une baisse de productions de 10 % et 9 % de la fumure organique animale dans le territoire villageois par rapport au scénario de référence.

Dans le scénario d'innovation technique, la production de fumure organique animale a baissée (de la 1^{ère} à la 5^{ème} année de simulation) plus fortement avec 30 % AC qu'avec 10 % AC comparé au scénario de référence. La baisse a été de 30 % et 32 % les deux premières années de simulation avec 30 % AC et de 6 % et 8 % pour les mêmes périodes avec 10 % AC.

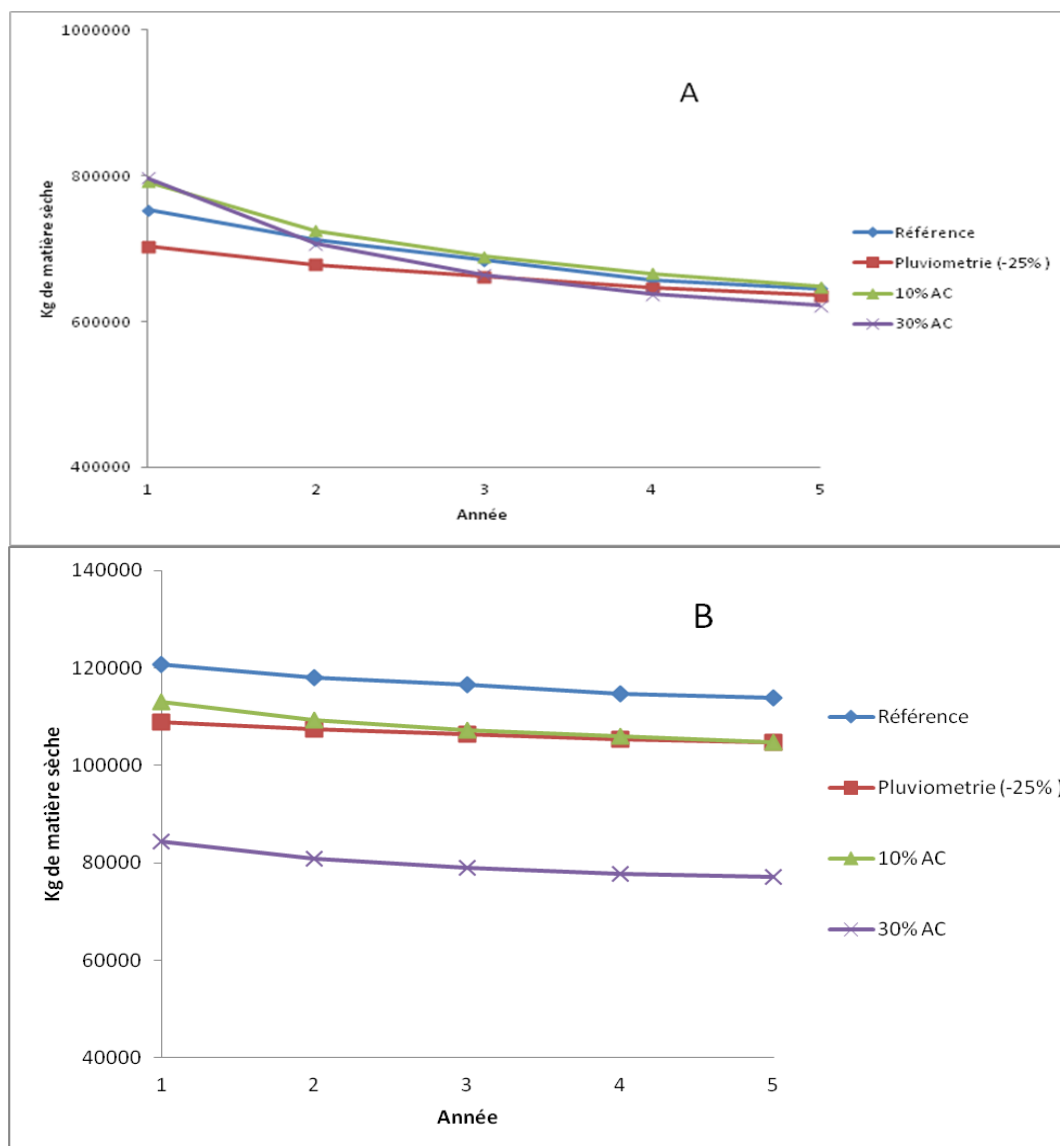


Figure 13 : Productions de grain de maïs (A) et de la fumure organique animale (B) avec les scénarios, climatique et d'innovation technique à l'échelle du territoire villageois

Evolution de la fertilité de sol dans les scénarios climatique et d'innovation technique

La fertilité de sol dans le scénario climatique a été supérieure à celle de la situation de référence durant les 5 années de simulations (Figure 14). Elle a été par contre en dessous de celle de référence dans les scénarios d'innovation technique. Cette baisse de la fertilisé est plus marqué avec 30 % AC qu'avec 10 % AC.

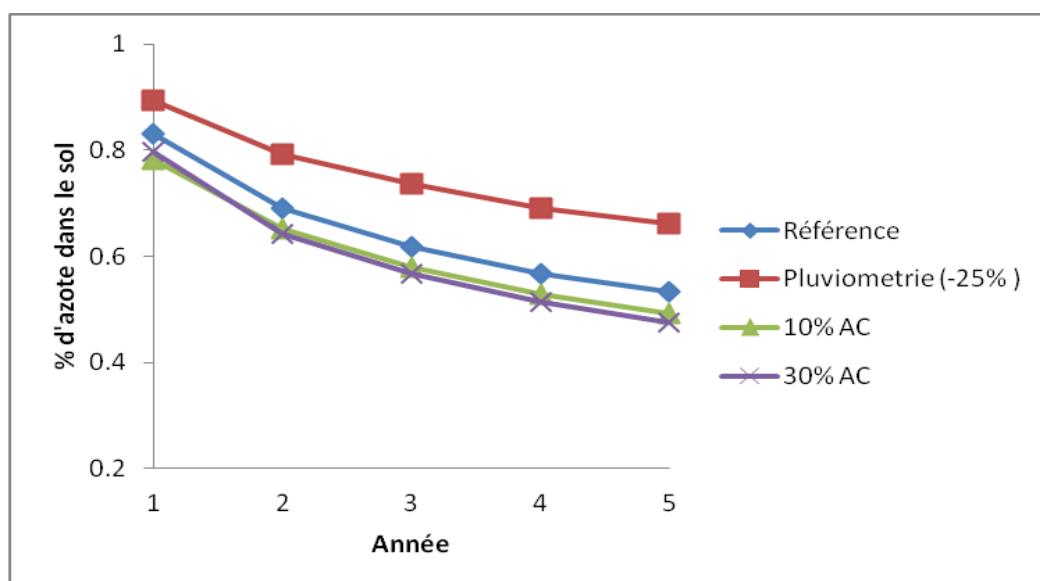


Figure 14 : Evolution de la fertilité de sol dans les scénarios, climatique et le scénario d'innovation technique à l'échelle du territoire villageois

3.2.4 Simulation de scénarios climatique et d'innovation technique à l'échelle de l'exploitation agricole

Production de grain de maïs avec les scénarios climatique et d'innovation technique

La production en grain de maïs a chuté avec le scénario climatique pour tous les types d'exploitations agricoles au cours des 5 années de simulation (Figure 15). Cette baisse de production de grain a été plus marquée les deux premières années de simulations pour les types, éleveur – agriculteur PA (18 % et 11 %), agriculteur –éleveur AP (7 % et 7 %) et le producteur intégré au marché MO (7 % et 1 %). Le producteur d'agriculture subsistance SO (3 % et 2 %) a été le moins affecté dans le scénario climatique avec 3 % et 2 % les deux premières années.

Dans le scénario d'innovation technique avec 10 % AC, la production de grain de maïs a légèrement augmenté pour tous les types d'exploitations (Figure 15). Le type MO a présenté la production en grain de maïs la plus élevée (8 % et 11 %) les deux premières années notamment. L'augmentation de la production de maïs pour les autres types exploitations a été de 3 % et 2 %, 3 % et 1 %, 2 % e 1 % pour PA, SO et AP respectivement. Au delà de la deuxième année, la production en grain de maïs de tous les types d'exploitations agricoles n'a pas été très différente de celle de la situation de référence.

Dans le scénario d'innovation technique avec 30 % AC, excepté, on observe une augmentation de 10 % de la production de grain pour les deux types, PA et AP, la première année., A partir de la deuxième année la production de grain de maïs pour ces deux types, a baissé de façon progressive avec un maximum respectivement de baisse de -6 % et -8 %.

La production de grain de maïs pour les types MO et SO a par contre été supérieure à leur situation de référence pour les 5 années de simulation avec des maximum de 12 % et 18 % respectivement.

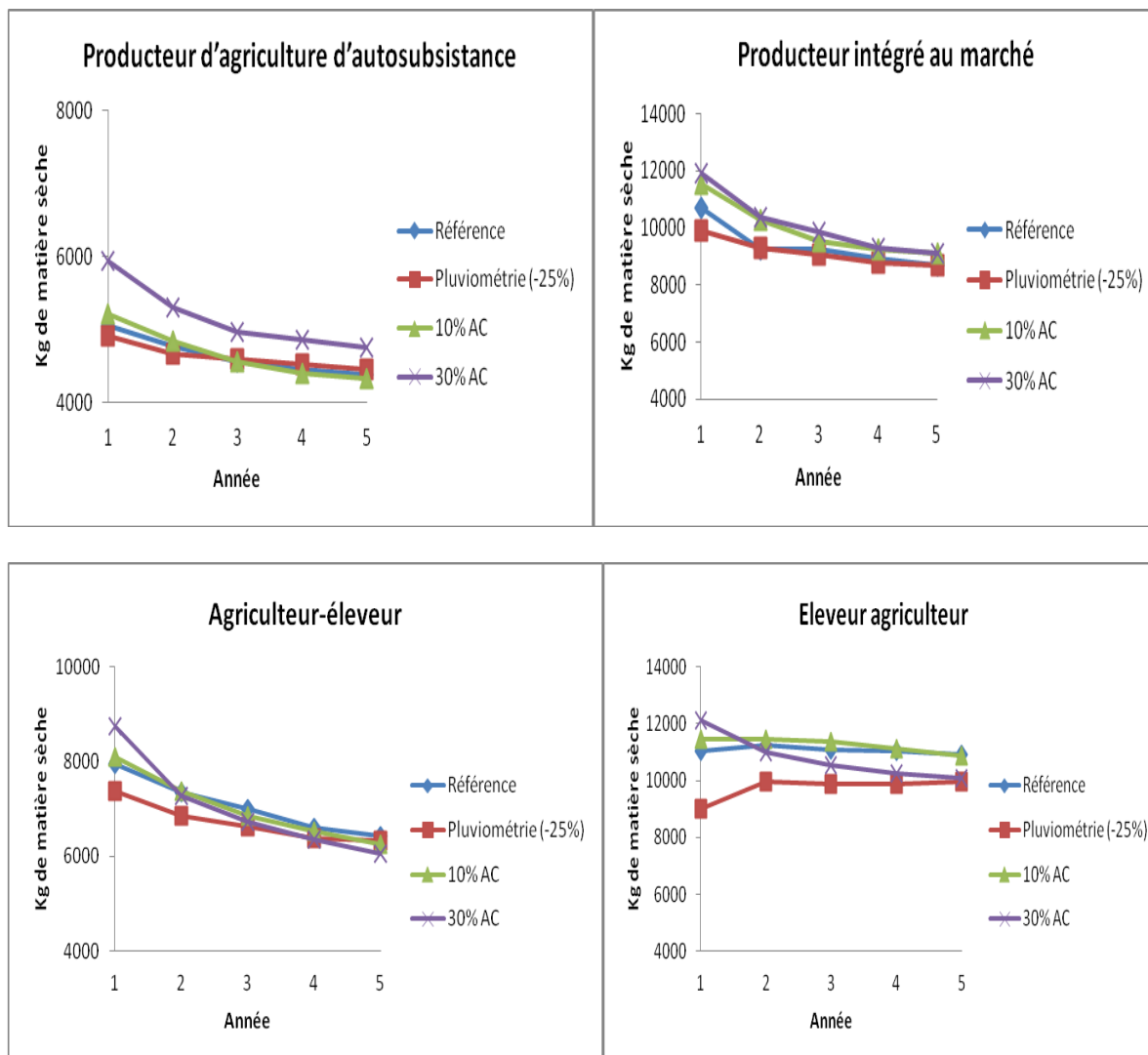


Figure 15 : Production de grain de maïs par type d'exploitation agricoles avec les scénarios, climatique et d'innovation technique

Production de fumure organique animale dans les scénarios, climatique et d'innovation technique

La production de fumure organique animale (PF) a baissé dans le scénario climatique chez tous les types d'exploitation (Figure 16). Cette baisse de la production de la PF a été plus importante pour les types, AP (8 % et 6 %) et PA (6 % et 5 %), les deux premières années de simulations. Les pertes en fumure organique animale ont été moindres pour les types, MO (4 % et 3 %) et SO (2 % et 0,1). Pour les scénarios d'innovation technique la PF a baissé plus fortement avec 30 % AC qu'avec 10 % AC (Figure 16). Dans ce dernier cas, la baisse de la production de la PF a été plus marquée pour les types MO, PA et AP avec un maximum de baisse respectivement sur les 5 années de simulation de 11 %, 8 % et 7 %. Le type SO a eu la baisse de production de PF la plus faible (5 %). Dans le scénario avec 30 % AC, des fortes baisses de PF ont été observées chez AP (18 % et 19 %), MO (23 % et 26 %), SO (14 % et 15 %) et PA (11 % et 12 %).

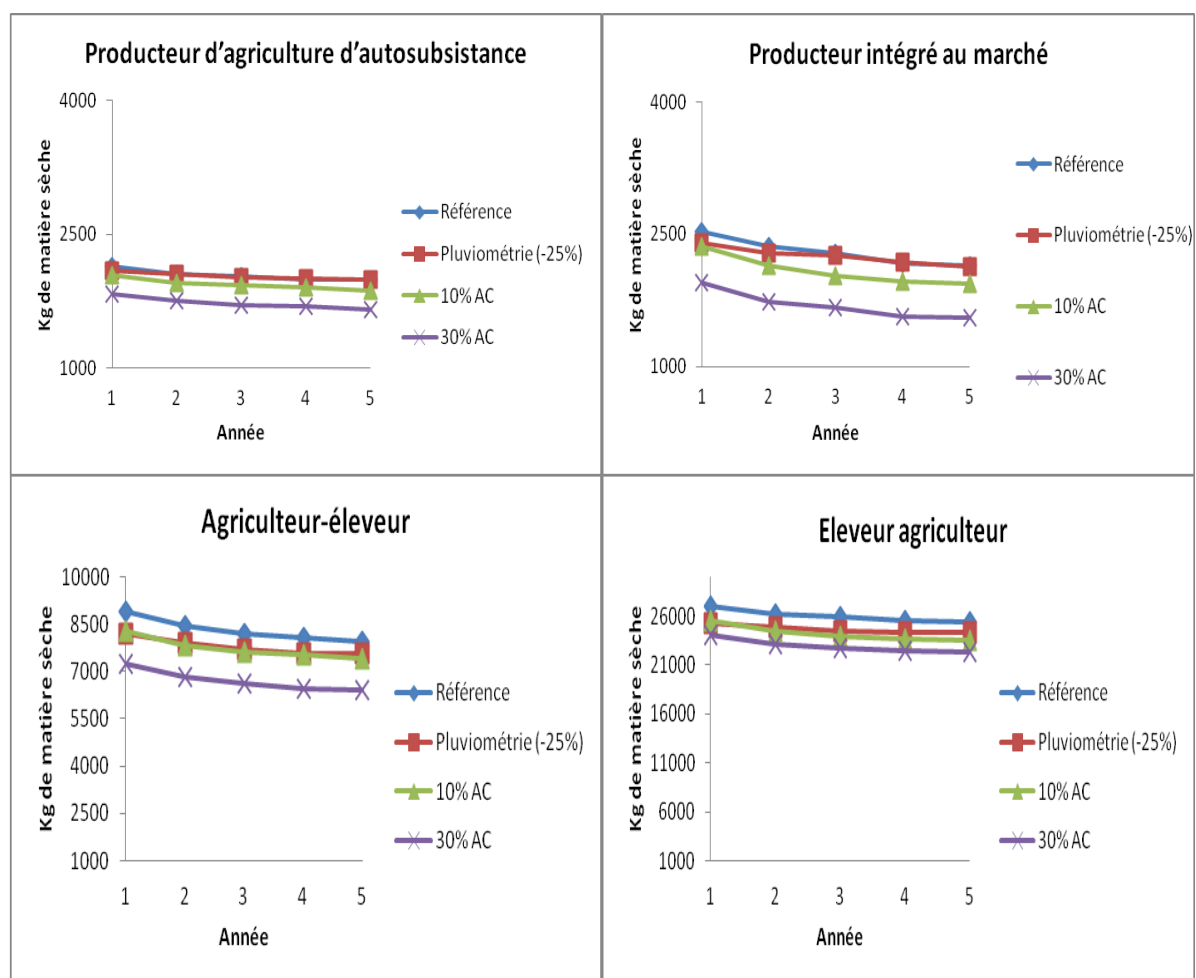


Figure 16 : Production de fumure organique animale par les types d'exploitation agricoles avec les scénarios, climatique et d'innovation technique

Evolution de fertilité de sol

La fertilité de sol dans le scénario climatique a été supérieure à celle de la situation de référence pour les 4 types d'exploitation agricoles durant les 5 années de simulations (Figure 17). Les écarts de fertilité entre la situation de référence et le scénario climatique les plus importants ont été observés pour les types, AP (13 % et 20 %) et PA (8 % et 11 %) les deux premières années notamment. Pour les types, MO et SO, l'écart entre le FSSC1 et FSSC0 a été inférieur à 10 %.

Dans les scénarios d'innovation technique avec 10 % AC et avec 30 % AC, la fertilité de sol a baissé pour tous les types d'exploitations agricoles et pour les 5 années de simulations (Figure 17). La baisse de la fertilité de sol a été plus importante pour les types, MO (8 % et 12 % avec 10 % AC et 5 % et 8 % avec le 30 % AC) et SO (4 % et 5 % avec 10 % AC, 4 % et 6 % avec 30 % AC) les deux premières années.

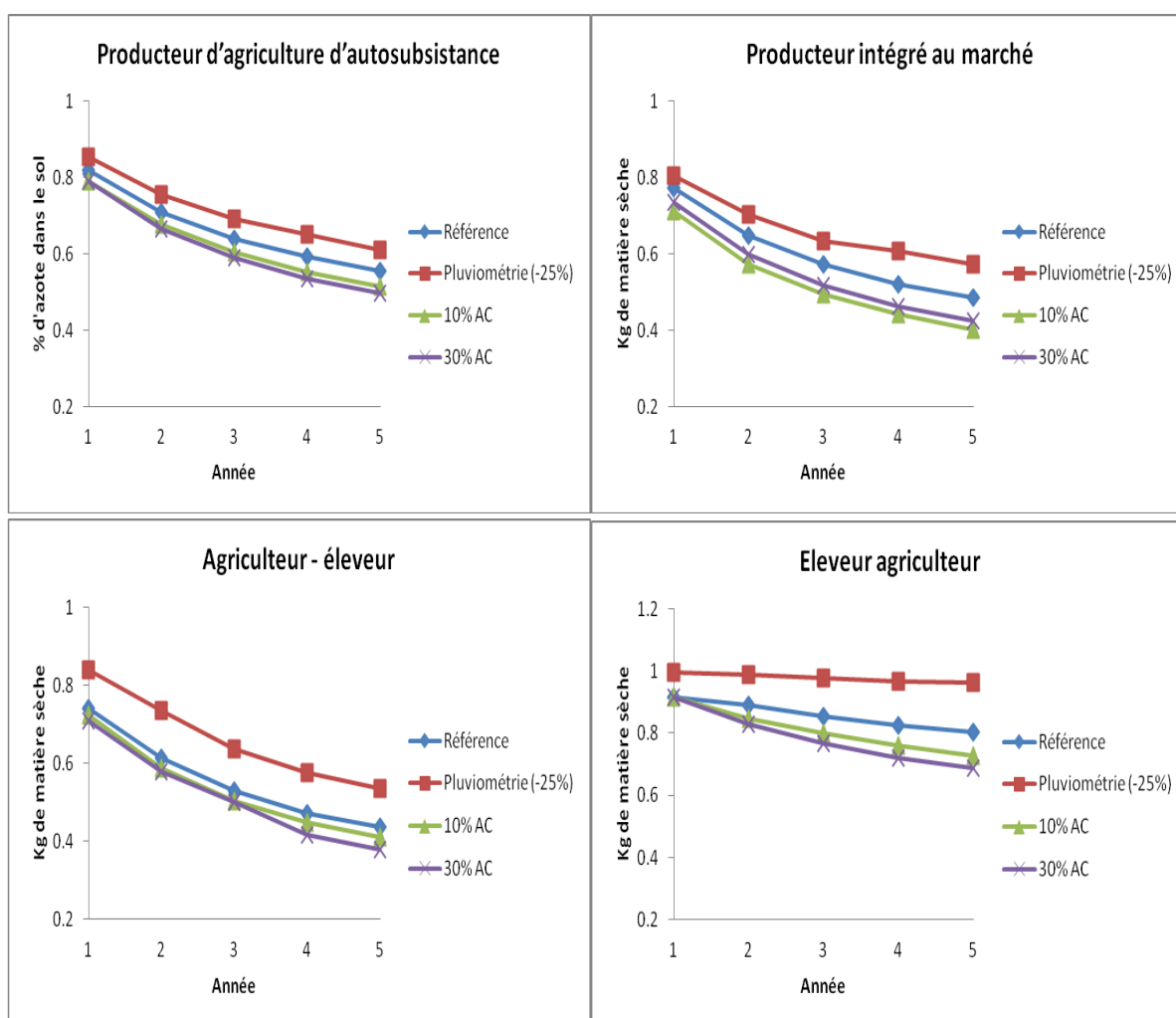


Figure 17 : Evolution de la fertilité de sol chez les types d'exploitation agricoles avec les scénarios, climatique et d'innovation technique

4. DISCUSSIONS ET CONCLUSION

4.1 Les performances du modèle

Le modèle MASTeR simule les transferts de nutriments dans le territoire villageois notamment ceux réalisés entre les différents types d'exploitation. Dans le territoire villageois de l'étude, les résidus de récolte des parcelles des exploitations pauvres sont broutés par les animaux des autres exploitations. Tandis que ces dernières accumulent d'importantes quantités de fèces sur leurs parcelles via le parcage de leurs animaux, les exploitations pauvres voient la fertilité de leurs parcelles baisser progressivement (cf. chapitre 1). Le modèle MASTeR rend compte de ces interactions et reproduit les tendances d'accumulation des fumures organiques et des productions (grain) observées chez ces différents types d'exploitation (Tableau 6). Cette prise en compte des interactions entre les types d'exploitations agricoles dans l'accès aux fertilisants organiques et leurs implications pour le maintien de la fertilité de sol par ces acteurs, distingue fondamentalement le modèle MASTeR des autres modèle multi – agents développés auparavant (CaTMAS, Belem et al., 2011).

4.2 Effets de scénarios, climatique et d'innovation technique sur la production en grain, en paille et en fumure organique animale

Une baisse des pluies en Afrique de l'ouest a un effet direct sur la réduction des rendements (Nelson et al., 2009 ; Boubacar et al., 2013). La production de la fumure organique par les animaux de son côté est indirectement affectée par cette baisse, via notamment la baisse de la paille pouvant être consommée dans le territoire villageois. Le modèle MASTeR simule ces baisses de productions de grain, de paille (non montré) et de fumure organique animale à diverses échelles d'analyse. A l'échelle de l'exploitation notamment, une baisse de 25 % de la pluviométrie affecte différemment les types d'exploitation agricoles. Les types éleveur – agriculteur et l'agriculteur -éleveur subissent de manière générale les plus grandes baisses de productions en grain et en fumure organique que les autres types (Figure 16 et 17). L'utilisation plus importante de fertilisants organique pour la croissance des cultures par ces types d'exploitation explique ces grandes pertes de production. En effet, avec la baisse de la pluviométrie, la production de fumure organique et les apports sont réduits du fait de la diminution de la paille disponible pour les animaux de ces types d'exploitation.

Le phénomène inverse est observé dans les scénarios d'innovation technique avec 10 % AC et avec 30 % AC pour la production de grain.

L'utilisation plus importante de fertilisants minéraux par les types, producteur intégré au marché, producteur d'agriculture de subsistance, leurs permettent d'obtenir des gains en production de maïs supérieurs dans le scénario d'innovation technique malgré des baisses de fumure organique.

La production de fumure organique baisse avec les scénarios, climatique et d'innovation technique. Dans le scénario climatique, cette baisse est plus importante chez les types, éleveur – agriculteur et agriculteur –éleveur.

Avec l'introduction de l'agriculture de conservation (10 % ou 30 % du totale de la superficie cultivable de chaque exploitation), la quantité de paille de maïs consommée par les animaux est réduite. Cela a pour conséquence une baisse de la quantité de fumure organique produite par les animaux des types, éleveur – agriculteur et agriculteur –éleveur de manière générale.

4.3 Effets de scénarios, climatique et d'innovation technique sur la fertilité de sol

La fertilité de sol simulée avec le modèle MASTeR est nettement au dessus de celle de l'état de référence dans le scénario climatique. Les types, éleveur –agriculteur et agriculteur – éleveur ont en général des niveaux de fertilité plus élevés dans le scénario climatique (Figure 18). L'explication du niveau élevé de la fertilité de sol dans le scénario climatique est du au fait que dans ce modèle, la fertilité est basée essentiellement sur le ratio entre les apports d'azote et les prélèvements. Moins il y a de prélèvements d'azotes par les cultures pour sa croissance, plus le niveau de la fertilité est élevé. Les types, éleveur –agriculteur et agriculteur – éleveur on eu de faibles productions de grain et de paille donc peu de prélèvements d'azote par les cultures dans le scénario climatique.

Dans les scénarios d'innovation technique avec 10 % ou 30 % d'introduction de l'agriculture de conservation, la fertilité du sol diminue par rapport à la situation de référence pour tous les types d'exploitation. Toutefois les types, producteur intégré au marché et producteur d'agriculture de subsistance se distinguent par le niveau de fertilité les plus bas dans le scénario d'innovation technique (Figure 18). Les prélèvements réalisés par les cultures à travers le gain de production en grain notamment expliquent cette baisse observée chez ces deux types d'exploitation agricoles. Les producteurs avaient jugées peu réalistes une introduction de l'agriculture de conservation sur 30 % de leur surface cultivée. Les simulations leur donne raison mais le résultat est nuancé en fonction du type de producteur.

En effet avec ce scénario, la production de fumure organique animale et la production de grain de maïs baissent plus fortement que dans celui de 10 % d'introduction de l'AC pour les types éleveur – agriculteur et agriculteur –éleveur. Les types MO et SO enregistrent eux des augmentations de production de grain supérieures à 10 % pour ce scénario. On peut alors penser que l'introduction de l'AC sur des surfaces importantes pourrait engendrer des tensions entre types de producteurs. Andrieu et al (2014) faisaient le même constat pour d'autres pratiques promues par la recherche telles que le compost ou la production de stocks fourragers et elles aussi basées sur une appropriation des résidus de culture. On constate une légère hausse de production en grain de maïs pour tous les types d'exploitations dans le scénario avec 10 % d'introduction de l'agriculture de conservation. Cela peut alors constituer une piste : introduire l'agriculture de conservation sur des surfaces limitées pour augmenter la production de façon graduelle sans effet négatifs et l'échelle du territoire villageois.

4.4 Futur développement du modèle

Nos simulations présentent certaines pistes pour améliorer le modèle MASTeR afin d'améliorer la représentation de systèmes de production des zones d'Afrique de l'Ouest. Dans le modèle, les fumures organiques et minérales disponibles sont allouées à part égale à toutes les parcelles au sein de l'exploitation. Dans la réalité, les exploitations agricoles réalisent très souvent des arbitrages qui les poussent à donner plus de soin à certaines parcelles qu'à d'autres, voire à certaines activités qu'à d'autres (chapitre 2). La dynamique de la fertilité de sol est essentiellement fondée sur la teneur du sol en azote. Le couplage du modèle multi – agent MASTeR avec des modèles de biophysiques pourrait être réalisé afin de prendre en compte plus finement les divers processus biophysiques (capture de lumière et de l'eau, décomposition et interaction des nutriments N,P,K, etc.). La dynamique des troupeaux (naissances, morts, ventes) et la production de lait par les vaches sont d'autres aspects importants à intégrer dans le modèle MASTeR permettant une meilleure analyse des systèmes de productions dans les zones d'Afrique de l'Ouest. Il représente en l'état déjà un outil intéressant pour analyser les effets d'un changement technique sur les différents types de producteurs et usagers d'une ressource commune telle que les résidus de culture. Les échanges avec les producteurs montrent qu'ils avaient du mal à estimer l'effet précis des scénarios sur la production agricole (tableau 20) avec en particulier une perception très négative du scénario d'introduction de l'AC.

Ce type d'outil pourrait alors leur permettre d'estimer plus finement les effets de l'introduction de changements techniques et de formuler avec eux une gamme plus importante de scénarios qui pourraient être différenciés en fonction du producteur.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE

1. INTRODUCTION

Dans les systèmes agropastoraux d'Afrique de l'ouest, l'accessibilité aux résidus de récoltes comme fertilisants organiques pour la production de cultures est le facteur déterminant pour la productivité de sols exploitations agricoles (Bationo, 1991, Dugue et al., 2004 ; Autfray et al., 2008 ; Andrieu et al., 2014).

Les efforts d'amélioration de la fertilité de sol dans les territoires villageois de l'Afrique de l'ouest doivent combiner des approches permettant d'une part une meilleure connaissance des systèmes de production concernés et de leurs interactions e, et d'autre part d'explorer et d'évaluer à travers la modélisation des options innovantes.

L'objectif principal de cette thèse était d'explorer différents scénarios de changements de flux de nutriments à l'échelle du territoire villageois sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux et la productivité du sol afin de contribuer à l'élaboration de cadres de gestion des ressources agropastorales (résidus de récolte et herbes de pâturage).

Trois hypothèses ont été testées :

- les différentes stratégies de gestion de résidus de récolte déterminées par la diversité des exploitations agricoles conduisent à des nouvelles dynamiques des flux et des bilans en nutriments différenciés ;
- la variabilité de la productivité de sols et les écarts de rendements observés entre les différentes exploitations agricoles peuvent s'expliquer par leurs caractéristiques socio – économiques qui définissent leurs stratégies de gestion de la fertilité de sol et des cultures ;
- la baisse de la production de fumure organique animale chez les types d'exploitation agricole est plus importante dans le scénario d'innovation technique que dans celui de changement climatique.

Pour tester ces hypothèses j'ai mis en place un dispositif combinant le suivi et la quantification de flux de ressources (fertilisants organiques et minéraux) à différentes échelles (territoire, exploitation et parcelle), et la construction et l'utilisation d'un modèle multi –agent pour simuler les effets des flux de ces ressources sur la production de biomasses (grain, paille et fumure organique animale) et la fertilité de sol.

Deux villages d'étude ont été choisis : Yilou et Koumbia du fait de conditions agroclimatiques et démographiques contrastées, pouvant avoir des répercussions sur la production et l'utilisation de la biomasse.

Dans ce chapitre, je synthétise les principaux résultats en lien avec les trois hypothèses testées et, discute des atouts et limite de l'étude et identifie de nouvelles questions de recherche qui pourraient être explorées.

2. LES DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE GESTION DE RÉSIDUS DE RÉCOLTE DÉTERMINÉES PAR LA DIVERSITÉ SOCIO-ÉCONOMIQUE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES CONDUISENT-ELLES À DES FLUX ET DES BILANS EN NUTRIMENTS DIFFÉRENTIÉS ?

Les exploitations agricoles dans les zones d'Afrique de l'Ouest sont hétérogènes notamment par leurs capacités de production (effectif d'animaux, main d'œuvre disponible, équipement, capitale, aire de production) et par leurs objectifs de production (autosuffisance, marché). Ces facteurs socio-économiques de production déterminent notamment les aptitudes de mobilisation des résidus de récolte par les exploitations au sein du territoire villageois. La prise en compte de l'hétérogénéité des exploitations agricoles est essentielle pour une formulation de stratégies de gestion de la fertilité adaptées à chacun de ces producteurs (Tittone et al., 2010). Sur la base des capacités de production et des objectifs de production, quatre types d'exploitations ont été identifiées : le producteur d'agriculture d'autosubsistance (T1), l'agriculteur – éleveur (T2), le producteur intégré au marché (T3) et le producteur à activités extra agricole dominant (T4) à Yilou, et le producteur d'agriculture d'autosubsistance (T1), l'agriculteur – éleveur (T2), le producteur intégré au marché (T3) et l'éleveur –agriculteur à Koumbia. Le T1 a une faible capacité de production. La superficie cultivable totale de ce type d'exploitation est comprise entre 3,8 - 4,5 ha et le nombre d'animaux entre de 4 – 9,6UBT. La production en grain du maïs est exclusivement utilisée pour l'autoconsommation. Le T2 a un nombre important d'animaux (17 – 37 UBT). La capacité de production de ce type est relativement importante (en moyenne, une superficie totale de 7 - 7,8 ha selon le village). Le T3 a une capacité de production que l'on peut qualifier de moyenne (une superficie totale comprise entre 4,9 - 10,2 ha et 5 - 7 UBT. Une large part de la superficie totale cultivable est dédiée à la culture de rente (coton ou oignon selon le village). Le T4 à Yilou a une très faible capacité de production. La superficie cultivable totale de ce type est 1ha et le nombre d'animaux autour 0,9 UBT. Quarante pourcent de revenu de ce type d'exploitation proviennent des activités extra –agricoles.

Le T4 de Koumbia représente les éleveurs, propriétaire d'effectifs d'animaux importants (en moyenne 58 UBT). Ce type est constitué des nomades qui se sont sédentarisés et qui pratiquent aussi l'agriculture. L'élevage reste toutefois leur principale activité.

Plusieurs études ont analysé la dynamique de flux de nutriments entre les différentes unités territoriales des villages d'Afrique de l'Ouest (Dugué 2000 ; Achard et Benoit 2003 ; Manlay et al 2004 ; Schlecht et al 2004 ; Schlecht et al 2006). Nos résultats montrent que les flux de nutriments sont réellement gouvernés par la diversité socio-économique des exploitations agricoles. Notre analyse des flux des nutriments dans le village de Koumbia (chapitre 1) montre que les exploitations agricoles à capacité de production importante mobilisent d'importantes quantités de fertilisants organiques et minéraux dans le territoire villageois. Ainsi du fait du niveau important de la main d'œuvre (12 et 13 actifs) et de l'équipement de transport, le types T2 et T4 à Koumbia, stockent plus de résidus de maïs de leurs parcelles (50 %) que ne le font les autres exploitations avant le retour des animaux sur les parcelles récoltées. Durant la vaine pâture (accès libre des animaux sur l'aire de cultures), les animaux de ces mêmes types d'exploitation consomment d'une part entièrement les résidus de maïs de leurs propres parcelles et d'autre part, ceux des parcelles des autres types d'exploitations. La nuit ces animaux sont parqués sur les parcelles ou sur un parc de nuit et déposent une partie de leurs fèces et de l'urine. L'utilisation des engrais minéraux est aussi fonction de la diversité socio-économique des exploitations agricoles. Les plus grandes quantités d'engrais minéraux sont importées de manière générale par les T3 à Yilou et par les T2, T3 et T4 à Koumbia.

Pour ces différents types, j'ai alors calculé des bilans minéraux partiels. Le calcul de ces bilans montre que les bilans N and K des parcelles et exploitations sont négatifs pour la plupart des producteurs. Les exploitations des producteurs de type T4 montrent néanmoins des bilans positifs, du aux transferts via leurs animaux et la fumure produite des zones de pâturage et des résidus de culture des autres types de producteurs vers leurs propres champs cultivés. Ces producteurs n'échangent pas la fumure comme il était d'usage par le passé (Dugue et al., 2004). Par conséquent, la durabilité à long ou moyen terme des systèmes agropastoraux pose question. L'usage de quantités plus importantes de fertilisants minéraux peut alors permettre de rééquilibrer ces bilans mais l'augmentation du coût des intrants peut constituer un frein majeur. Plusieurs études se sont interrogées avant nous sur la durabilité des systèmes agropastoraux (Smaling et al. 1993 ; Schlecht, et al., 2004). L'analyse des flux et des bilans des types d'exploitation permet une caractérisation plus fine et différenciée, et une mise en évidence de la marge de progrès pour chaque exploitation.

3. LES FLUX ET LES BILANS EN NUTRIMENTS (DÉTERMINÉS PAR LA DIVERSITÉ SOCIO-ÉCONOMIQUE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES) EXPLIQUENT-ELLE LA VARIABILITÉ DE LA FERTILITÉ DE SOL, LES ÉCARTS RENDEMENTS ET LES EFFICIENCES DE L'UTILISATION DES NUTRIMENTS ?

Les résultats du chapitre 1 ont montré que les capacités de production (charrette, main d'œuvre, fèces des animaux, engrais minéraux et liquidité/crédit) influent sur les transferts de biomasse entre les exploitations et les bilans minéraux. Le chapitre 2 a permis une analyse encore plus fine du lien entre ces capacités de production et la productivité des sols. Nos résultats dans le chapitre 2 montrent que les types T2 à Yilou et à Koumbia, ainsi que le T4 à Koumbia, qui possède un nombre substantiel d'animaux et qui ont un accès à la fumure organique, utilisent plus de nutriments sur les parcelles des cultures principales (sorgho à Yilou et le coton et maïs à Koumbia) que les autres exploitations qui possèdent moins d'animaux. De même à Koumbia, l'accès aux fertilisants minéraux fourni par la société cotonnière fait que les quantités de fertilisants minéraux utilisés par les exploitations sont presque similaires pour toutes leurs parcelles. Par contre, les exploitations agricoles à facultés de production faibles (types, T1 et T4) à Yilou notamment, ne peuvent pas appliquer les fertilisants organiques et minéraux sur toutes leurs parcelles. Elles ont tendance à apporter des taux élevés de fertilisants organiques sur les parcelles proches de leur habitation au détriment des autres parcelles. L'insuffisance de ces fertilisants, le manque de moyens de transport les empêchent de faire des apports sur les parcelles distantes de leurs habitations. Ce mode de gestion de la fertilité de sol par ces exploitations à Yilou est à l'origine de gradients de fertilité de sol et d'écarts de rendements de cultures au sein de l'exploitation, avec des champs proches des habitations plus fertile (chapitre 2). Ces observations concordant avec celles rapportées pour d'autres régions en Afrique (Hailelassie et al., 2007 ; Masvaya et al., 2009 ; Tiftonnell et al. 2005b). Les gradients de fertilité de sol donnent lieu à une variation de la réponse aux engrais minéraux et une variation associée des rendements de cultures comme observées dans les différentes zones d'Afrique sub-sahariennes (Vanlauwe et al., 2006 ; Wopereis et al., 2006 ; Zingore et al., 2007). Des études ont montré que les exploitations agricoles visent principalement à améliorer les rendements des cultures sur les parcelles considérées comme moins fertile et à lutter ainsi contre l'érosion éolienne (Schlecht et Buerkert, 2004).

Nos résultats montrent qu'en général, les agriculteurs utilisent les nutriments sur les parcelles les plus propices de l'exploitation, c'est-à-dire les parcelles fertiles autour des habitations, du fait que les réponses des cultures devraient être plus élevées sur ces parcelles par rapport à celles plus distantes (chapitre 2). Les réponses des applications de nutriments par les exploitations dans notre étude augmentent avec l'accroissement des indicateurs de fertilité des parcelles (chapitre 2). Le maximum de l'efficacité d'utilisation de N (Nue) observé dans notre étude était de l'ordre de 50 kg de grain kg⁻¹ N pour le sorgho et 150 kg de grain kg⁻¹ N pour le maïs. Toutefois, les Nues moyens étaient beaucoup plus faibles, et de larges écarts de Nue ont été révélés entre les différents types d'exploitation. A Yilou, les rendements de sorgho étaient significativement différents ($P < 0,05$) entre le type T2 et les autres types de d'exploitation (T1, T3 et T4). Les rendements des principales cultures ont été également différents entre les types d'exploitation. A Koumbia, les différences de rendement de maïs entre les types d'exploitation ont été statistiquement significative ($P < 0,01$) avec les agropasteurs (T2), atteignant les plus hauts rendements. Ce type d'agriculteur a également enregistré les rendements de riz et de coton les plus élevés. Notre étude montre que ces différences de rendements entre les types d'exploitations agricoles sont attribuables à des diversités dans la gestion des cultures, notamment l'utilisation d'engrais et la disponibilité de la main-d'œuvre pour le semis en temps opportun et le désherbage. Cela signifie que non seulement les aspects biophysiques de la production agricole doivent être pris en compte, mais aussi les ressources disponibles pour les exploitations agricoles, comment elles sont utilisées et les contextes socio-économiques de différents types d'exploitation dans le territoire villageois. L'amélioration de la gestion interne de nutriments grâce à une meilleure intégration de l'élevage et de l'agriculture, et l'utilisation plus efficace des engrais disponible est la première option pour les exploitations à faible capacité en ressources de production. Par exemple, la fabrication de compost et la réhabilitation des champs de brousse infertiles avec du compost disponibles, les déchets ménagers ou du fumier demande relativement peu de capital externe, mais nécessite une plus grande participation de la main-d'œuvre. L'application continue d'engrais organique (même avec des petites quantités) permettrait en principe de reconstituer le stock de nutriments du sol (et de l'eau) en augmentant la matière organique du sol à long terme. De petites quantités d'engrais minéraux par microdosage peuvent être utilisés pour lancer la restauration des sols (Tifton et al., 2008a). Les agriculteurs ayant peu de bétail pourraient également investir davantage dans la collecte de leurs résidus de récolte pour le compostage ou pour une utilisation en tant que fourrage (pour l'alimentation du bétail pendant la saison sèche).

De cette manière, les éléments nutritifs pourraient être maintenus sur leurs exploitations et la productivité du sol augmenter à long terme.

4. LE MODÈLE MULTI-AGENT PERMET-IL D'ANALYSER LES EFFETS D'UNE BAISSSE DE LA PRODUCTION DE BIOMASSE À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE VILLAGEOIS ET DE L'EXPLOITATION AGRICOLE ?

Un modèle multi-agent, Multi Agent Simulator of Territory Ressource flows (MASTeR) a été conçu pour simuler les transferts de nutriments dans le territoire villageois notamment ceux réalisés entre les différents types d'exploitation et reproduire les tendances d'accumulation des fumures organiques et des productions (grain) observées chez ces différents types d'exploitation (chapitre 3). Cette prise en compte des interactions entre les types d'exploitations agricoles dans l'accès aux fertilisants organiques et leurs implications pour le maintien de la fertilité de sol par ces acteurs, distingue fondamentalement le modèle MASTeR des autres modèle multi – agents développés auparavant dans la zone (MIROT, Belem et al., 2006 ; CaTMAS, Belem et al., 2011). Trois types de scénarios ont été simulés avec le modèle MASTeR : (i) un scenario climatique caractérisé par une baisse de 25 % de la pluviométrie saisonnière par rapport à celle observée dans le village d'étude compte tenu des prévisions de baisse de la pluviométrie pour l'Afrique de l'Ouest dans plusieurs scénarios climatiques (Boubacar Ibrahim et al., 2013) (ii) un scénario technique pour lequel on teste l'introduction de l'agriculture de conservation pour son potentiel à améliorer la fertilité des sols (Baudron et al., 2009 ; Naudin et al., 2010) sur 10 % des surfaces cultivées de l'exploitation ; (iii) un second scénario technique où l'agriculture de conservation est testé 30 % des surfaces cultivées de l'exploitation . La simulation a permis de suivre notamment les indicateurs sur la production de grain et de fumure organique animale.

Elle a permis d'analyser les tendances entre scénarios à l'échelle du territoire villageois et entre producteurs. Ainsi, si sans surprise la baisse de la pluviométrie entraine une baisse des rendements à l'échelle du territoire villageois, elle a des résultats différenciés en fonction du type de producteur. Les types éleveur – agriculteur et agriculteur -éleveur subissent de manière générale les plus grandes baisses de productions en grain et en fumure organique liées à l'utilisation plus importante de fertilisants organiques pour la croissance des cultures affectés par la baisse des résidus de culture disponibles pour le pâturage des animaux.

Il est de même pour les scénarios d'innovation technique puisqu'avec l'introduction de l'agriculture de conservation (10 % ou 30 % du totale de la superficie cultivable de chaque exploitation), la quantité de paille de maïs consommée par les animaux est réduite. Cela a pour conséquence une baisse de la quantité de fumure organique produite par les animaux des types, éleveur – agriculteur et agriculteur –éleveur de manière générale. Dans le scénario avec 30 % AC en particulier, l'introduction de l'agriculture de conservation a un résultat négatif à l'échelle du territoire villageois mais positif à l'échelle de l'exploitation pour les types producteur d'agriculture de subsistance et producteur intégré au marché qui utilisent les plus grandes quantités d'engrais. Ces résultats confirment la pertinence de tenir compte de la diversité des types de producteurs dans la proposition d'alternatives de gestion de la fertilité. Andrieu et al. (2014) montrent que pour d'autres technologies basées sur l'appropriation des résidus de culture tels que le compost ou la production de fumure organique, celles-ci peuvent accroître les tensions entre types de producteurs. Le scénario avec 30 % AC en est l'illustration pour le cas spécifique de l'agriculture de conservation. Cela milite pour des propositions différenciées en fonction des types de producteurs ou une négociation des seuils de collection de ces résidus avec l'ensemble des acteurs concernés en utilisant des outils tels que le modèle MASTER. On voit en effet que pour une introduction de l'agriculture de conservation sur 10 % du territoire on peut observer des résultats supérieurs au scénario de référence pour l'ensemble des producteurs concernés. Néanmoins, l'effet négatif des propositions testées sur la production de fumure interroge sur la durabilité à moyen terme des solutions proposées. Des solutions sont à chercher auprès d'autres pratiques de gestion agronomiques appropriées, telles que les meilleures densités de semis, les semis à temps opportun et les doses optimales d'engrais peuvent améliorer sensiblement l'efficacité d'utilisation des nutriments (Vanlauwe et al., 2011).

5. FORCE ET FAIBLESSE DE LA DÉMARCHE ET POSSIBILITÉS FUTURES DE RECHERCHE

La démarche utilisée dans ma thèse combine (ii) des enquêtes de terrain ayant permis de décrire la diversité des types d'exploitation et de quantifier leurs flux de biomasse et l'effet induit sur la productivité des sols ; (iii) le développement et l'usage d'un outil de modélisation multi-agent. La démarche permet alors d'approfondir la connaissance sur les systèmes existants et d'explorer l'effet de changements intervenant au sein de ses systèmes.

Dans les systèmes agropastoraux caractérisés par la complexité des relations entre types de producteurs. L'usage d'outils capables de tenir compte de ces interactions est primordial. Plusieurs modèles ont été développés pour analyser l'effet de solutions techniques alternatives sur le fonctionnement des systèmes en Afrique sub-saharienne (Andrieu et al., 2012 ; Tittonell et al., 2009). Mais ces modèles centrés sur le fonctionnement de l'exploitation ne permettent pas d'analyser l'effet contrasté que peut avoir une solution à l'échelle de l'exploitation et du territoire. Plusieurs pistes peuvent être néanmoins identifiées pour améliorer le modèle MASTeR et la représentation de systèmes de production des zones d'Afrique de l'Ouest en considérant d'autres éléments que l'azote ou en le couplant avec des modèles biophysiques capables de simuler plus finement les divers processus biophysiques (capture de lumière et de l'eau, décomposition et interaction des nutriments N,P,K, etc.).

Les producteurs ont participé à l'élaboration du modèle conceptuel lors de la définition des représentations simplifiées des flux de biomasse pour les différents types de producteurs et de la discussion des scénarios. Un rôle plus actif aurait pu leur être donné en participant à l'identification des objectifs et variables utilisées dans le modèle ou en discutant avec eux sur les résultats des scénarios utilisés (Barreteau et al., 2007 ; Bousquet et al., 2007) (Bousquet & Castella, 2001). Le modèle MASTeR reste donc en l'état un outil de recherche. Son intérêt comme outil de discussion dans le cadre de plateformes multi-acteurs paraît intéressant à creuser. Plusieurs auteurs montrent que l'échec de l'adoption de solutions innovantes en Afrique de l'Ouest est lié à leur manque d'implication dans l'élaboration des solutions (Andrieu et al., 2011 ; Blanchard et al., 2010 ; Chia, 2004 ; Faure et al., 2010). Il est aussi sûrement à chercher dans le manque de prise en compte des effets de ces solutions sur les interactions et flux dans les systèmes agropastoraux.

Le modèle MASTeR finalisé incluant les différentes améliorations ci-dessus pourrait alors servir d'outil de discussion avec les acteurs au sein de plateformes d'innovation impliquant la recherche, les producteurs, les autorités traditionnelles et administratives ainsi que le secteur privé afin de co-construire des scénarios de gestion durable des agro écosystèmes système de production des zones d'Afrique de l'Ouest. Il faudrait alors être transparent sur les choix de modélisation et leur donner un rôle plus actif dans la définition et discussion de scénarios pouvant être différenciés en fonction des types de producteurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Bationo, A. U. M. (1991). Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 47, 217 – 225.
- Achard, F. and M. B. (2003). Fallows, forage production and nutrient transfers by livestock in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65, 183–189.
- Adriansen, H. K. (2006). Continuity and Change in Pastoral Livelihoods of Senegalese Fulani. *Agriculture and Human Values*, Volume 23(2), 215–229.
- Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, E., & Tittone, P. (2013). The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research*, 143, 106–118. doi:10.1016/j.fcr.2012.10.021
- Aime-Landry Dongmo, Eric Vall, Mohamadoun Amadou Diallo, Patrick Dugue, A. N. and J. L. (2012). Herding territories in Northern Cameroon and Western Burkina Faso: spatial arrangements and herd management. *Pastoralism*, 26.
- Andrieu N, Vayssières J, Corbeels M, Blanchard M, Vall E, T. P. (2015). From synergies at farm scale to trade-offs at village scale: the use of cereal crop residues in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso. *Agricultural Systems*, 1–40.
- Andrieu, N, Chia E, Vall, E. (2011). Recherche et innovations dans les exploitations de polyculture-élevage d’Afrique de l’Ouest Quelles méthodes pour évaluer les produits de la recherche ? *Revue D’élevage et de Médecine Vétérinaire*, 64.
- Autray, P., Sissoko, F., Falconnier, G., & Ba, A. (2012). Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage : étude de cas au Mali-Sud. *Cahier D’agriculture*, 21, 225–234.
- Ayantunde, A.A., Fernandez-Reivera, S., Hiernaux, P.H.Y., Van Keulen, H., Udo, H.M.J. and Chanono, M. (2000). Effect of Nocturnal Grazing and supplementation on diet selection, eating time, forage intake and weight changes in cattle. *Animal. Sciences.*, 71, 333–340.
- B.H. Janssen I, F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf and, H. van R. (1990). A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Elsevier Science Publishers*, 46, 299–318.
- Bah, A., Toure, Ibra, Mariem Seck Diallo, Alassane Bah, Alioune Ka, Massamba Thiam Maguette Kaire, T. D. D., & Page, C. Le. (2003). An agent-based model for understanding the multiple uses of land and resources around drilling sites in Sahel. ... *Congress on Modelling and ...*, 1060–1065.

- Barbier B, Yacouba H, Karambiri H, Zoromé M, S. B. (2009). Human vulnerability to climate variability in the Sahel: farmers' adaptation strategies in northern Burkina Faso. *Environmental Management*, 43, 790–803.
- Barreteau, O. (2000). SHADOC : a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems, 94, 139–162.
- Barreteau, O., Le Page, C., & Perez, P. (2007). Contribution of simulation and gaming to natural resource management issues: An introduction. *Simulation & Gaming*, 38(2), 185–194. doi:10.1177/1046878107300660
- Bationo A and Mokwunye. (1991). Role of manures and crop residues in alleviating soil fertility constraints to crop production with special reference to the Sahelian zones of West Africa. *Fertilizer Research*, 29, 125–177.
- Bationo, A., J. Kihara, B. Vanlauwe, B. Waswa, and J. K. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agric. Syst.*, 94, 13–25.
- Belaqziz, S., El, A., El, M., & Le, M. (2011). An agent-based modeling approach for decision- making in gravity irrigation systems, (December), 11–14.
- Belem, M., Manlay, R., Müller, J., & Chotte, J. (2011). CaTMAS : A multi-agent model for simulating the dynamics of carbon resources of West African villages. *Ecological Modelling*, 222(20-22), 3651–3661. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.08.024
- BELEM, M., Sansan, Y., & Bruno, B. (2006). MIROT: A multi-agent system model for the simulation of the dynamics of carbon resources of a West-African village territory. In *International Conference on Regional and Urban Modeling*” (p. 22).
- Blanchard M., S. L., & Vall, E. (2005). *Diagnostic agropastoral de koumbia. Document de travail. URPAN. CIRDES.*
- Blanchard M., VALL E., CHIA E., 2010. (2010). Conduire une expérimentation en recherche action en partenariat : co-concevoir une innovation, l'étudier. In *Innovation and sustainable development in agriculture and food*. Montpellier- France.
- Boateng, S. (2009). *Mucuna pruriens* and its effect on some physical, chemical and biological properties of a Forest Acrisol. *West African Journal of Applied Ecology*, 8(1). doi:10.4314/wajae.v8i1.45789
- Boubacar Ibrahim , Harouna Karambiri, J. P., & Ribstein, Hamma Yacouba, P. (2013). Changes in rainfall regime over Burkina Faso under the climate change conditions simulated by 5 regional climate models. *Climate Dynamics*, 42(5-6), 1363–1381. doi:10.1007/s00382-013-1837-2
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., & Page, C. Le. (1998). Cormas : Common-Pool Resources and Multi-agent Systems. *Computer Science*, 1416, 826 – 837.

- Bousquet, F., & Castella, J. (2001). The use of multi-agent simulations in companionable modelling approach for agro-ecosystem management. ... *Management, August ...*, 28–31.
- Bousquet, F., Castella, J., Trébuil, G., Barnaud, C., & Boissau, S. (2007). Using multi-agent systems in a companion modelling approach for agro- ecosystem management in South-east Asia, *36*(1), 57–62.
- Bousquet, F., & Le Page, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, *176*(3-4), 313–332. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011
- Breman, H. Debrah, S. K. (2003). Improving African food security. *SAIS Review. Winter-Spring*, (23)1, 153 – 170.
- Brouwer, J., Fussell, L. K., & Herrmann, L. (1993). Soil and crop growth micro-variability in the West African semi-arid tropics: a possible risk-reducing factor for subsistence farmers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *45*(3-4), 229–238. doi:10.1016/0167-8809(93)90073-X
- CEDEAO. (2006). Stratégie Régionale de Promotion des Engrais en Afrique de l 'Ouest. Sommet Africain sur les engrais, 9–13.
- Cobo, J. G., Dercon, G., & Cadisch, G. (2010). Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *136*(1-2), 1–15. doi:10.1016/j.agee.2009.11.006
- Collectif ComMod. (2005). La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés*, *13*, 165–168.
- Coraf, P. (2012). *Diagnostics agropastoral du village de Koumbia. Projet Coraf*.
- Corbeels, Marc, Abebe shiferaw, M. H. (2000). Farmers ' knowledge of soil fertility and local management strategies in. *Managing Africa's Soils*, *10*, 23 pp.
- Dabire Der. (2013). *Analyse de la situation initiale des acteurs dans les villages de Koumbia , Sindri et Yilou*.
- De Ridder, N., Breman, H., Van Keulen, H., Stomph, T. J. (2004). Revisiting a cure against land hunger : soil fertility management and farming systems dynamics in the West African Sahel. *Agricultural Systems*, *80*, 109–131.
- Defoer, Toon Budelmann, Arnoud Toulmin, C. Carter, Simon E., J. T. (1998). Building common knowledge : Participatory learning and action research Chapter 3 : Sources and flows of nutrients in farming. In *Soil fertility management in Africa : A resource guide for participatory learning and action research. Royal Tropical Institute, Amsterdam, The Netherlands / International Institute for Environment and Development, London, U.K.*.
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu N, Vayssières J, Corbeels M, Blanchard M, Vall E, T. P., Djamen, P., & Tiltonell, P. (2015). Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-

- pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*.
- Djaby, B. (2010). *Modélisation spatiale des flux organiques et minéraux assurant la productivité durable des systèmes culture-élevage dans le sahel nigérien*. Academie universitaire Wallone-Europe/Université de Liège.
- Dongmo, A. L. (2012). Herding territories in Northern Cameroon and Western Burkina Faso: spatial arrangements and herd management. *Pastor Res Policy Pract*, 2: 26. doi:10.1186/2041-7136-2-26
- Dongmo, A. L., Djamen, P., Vall, E., & Coulibaly, D. (2012). Du nomadisme à la sédentarisation L'élevage d'Afrique de l'Ouest et du Centre en quête d'innovation et de durabilité. *Revue D'ethnoécologie*, 1(2012), 1–17.
- Drechsel, P., Gyiele, L., Kunze, D., & Cofie, O. (2001). Population density, soil nutrient depletion, and economic growth in sub-Saharan Africa. *Ecological Economics*, 38(2), 251–258. doi:10.1016/S0921-8009(01)00167-7
- Drees L.R., Manu A., W. L. (1993). Characteristics of aeolian dusts in Niger, West African. *Geoderma*, 59, 213 – 233.
- Dugue, P. (2000). biomasse et gestion de la fertilité à l'échelle des terroirs. Étude de cas au Nord-Cameroun et essai de généralisation aux zones d'Afrique sub-saharienne. *Fertilité et Relations Agriculture-Élevage En Zone de*
- Dugue, P. (2006). Le tissage des relations agriculture-élevage, 15, 72–79.
- Dugue, P., Vall, E., Lecomte, P., Klein, H., Rollin, D., & Réunion, L. (2004). Evolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre Un nouveau cadre d'analyse pour améliorer les modes d'intervention et favoriser les processus d'innovation. *Oléagineux Corps Gras Lipides*, 11 (4-5) :, 268–276.
- E, C. (2004). Principes, méthodes de la recherche en partenariat : une proposition pour la traction animale. *Rev. Elev. Méd. Vét. Pays Trop*, 57, 233–240.
- Eric Vall, Patrick Dugue, M. B. (2006). Le tissage des relations agriculture-élevage. *Cahiers Agricultures Vol. 15, N° 1, Janvier-Février 2006*, 15, 72–79.
- F., H. (2002). MANAGEMENT OF MANURE IN FARMING SYSTEMS IN SEMI-ARID WEST AFRICA. *Experimental Agriculture*, 38, 131–148.
- Faure G., Gasselin P., Triomphe B., Hocd E H., T. L. (2010). Innover avec les acteurs du monde rural : la recherche-action en partenariat. *Quae*, 224.
- Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective* (InterEditi.).

- Frederic Baudron, Marc Corbeels, Francois Monicat, K. E. G. (2009). savannahs , opportunities and challenges for conservation. *Biodivers Conserv*, 2625–2644. doi:10.1007/s10531-009-9663-x
- Gandah, M., Brouwer, J., Hiernaux, P., Duivenbooden, N. Van, Livestock, I., & Centre, I. S. (2003). Fertility management and landscape position : farmers ' use of nutrient sources in western Niger and possible improvements. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55–66.
- Gray, L. C. (1999). Is land being degraded? A multi-scale investigation of landscape change in southwestern Burkina Faso. *Land Degradation & Development*, 10(4), 329–343. doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199907/08)10:4<329::AID-LDR361>3.0.CO;2-I
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., & Railsback, S. F. (2010). The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23), 2760–2768. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019
- H. and Breman, H. van K. (1990). Agricultural development in the West African Sahelian region: A cure against land hunger? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol 32.
- Haileslassie, A., Priess, J. a., Veldkamp, E., & Lesschen, J. P. (2007). Nutrient flows and balances at the field and farm scale: Exploring effects of land-use strategies and access to resources. *Agricultural Systems*, 94(2), 459–470. doi:10.1016/j.agry.2006.11.013
- Harris, F. M. . (1998). Farm-level assessment of the nutrient balance in northern Nigeria. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 71(1-3), 201–214. doi:10.1016/S0167-8809(98)00141-8
- Henao, J., & Baanante, C. (2006). Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa Prepared by Summary of the Paper Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa Policy Development, (March).
- Hiernaux, P., Ayantunde, A.A., Fernandez-Reivera, S., Hiernaux, P.H.Y., Van Keulen, H., Udo, H.M.J. and Chanono, M., Kalilou, A., Mougin, E., Gérard, B., Baup, F., ... Djaby, B. (2009). Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger: Impact of land use, management and variable rainfall. *Journal of Hydrology*, 375(1-2), 65–77. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.032
- Hiernaux, P., Mougin, E., Diarra, L., Soumaguel, N., Lavenu, F., Tracol, Y., & Diawara, M. (2009). Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375(1-2), 114–127. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.005
- I. OUEDRAOGO, M. TIGABU, P. SAVADOGO, H. COMPAORE, P. C. O. ´. A. J. M. O. (2010). LAND COVER CHANGE AND ITS RELATION WITH POPULATION DYNAMICS IN BURKINA FASO , WEST AFRICA. *Land Degradation & Development*, 1–10.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. (C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe, Eds.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139177245

- Kanté, S. (1998). *Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud*. Wageningen Universite.
- Kessler, J. J. & Breman, H. (1991). The potential of agroforestry to increase primary production in the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Agroforestry Systems*, 62.
- L, C. G. (1999). Is land being degraded? A multi-scale investigation of landscape change in southwestern Burkina Faso. *Land Degradation & Development*, 10, 43.
- Laboratoire Sol du CIRAD. (2004). *Catalogue des analyses courantes*. Montpellier- France.
- Landais, É., & Lhoste, P. (1993). Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone de savanes africaines. *Cahiers Agricultures*, 2, 17.
- Laris P, Foltz JD, V. B. (2015). Taking from cotton to grow maize: The shifting practices of small-holder farmers in the cotton belt of Mali. *Agric Syst*. doi:doi:10.1016/j.agry.2014.10.010
- Le, Q. B., Tamene, L., & Vlek, P. L. G. (2012). Multi-pronged assessment of land degradation in West Africa to assess the importance of atmospheric fertilization in masking the processes involved. *Global and Planetary Change*, 92-93, 71–81. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.05.003
- Levang M., G. P. (1980). Méthodes d'étude de la Biomasse herbacée de formations sahéniennes : application à la Mare d'Qursi, Haute-Volta. *CEcol. Plant.*, 1980, I (15)(3), 231–244.
- Maccarthy, D. S., Agyare, W. A., Vlek, P. L. G., & Adiku, S. G. K. (2013). Spatial Variability of Some Soil Chemical and Physical Properties of an Agricultural Landscape. *West African Journal of Applied Ecology*, 21(2), 47–61.
- Manlay, R., Ickowicz, a., Masse, D., Feller, C., & Richard, D. (2004). Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna—II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79(1), 83–107. doi:10.1016/S0308-521X(03)00054-4
- Manlay, R., Ickowicz, a., Masse, D., Floret, C., Richard, D., & Feller, C. (2004). Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna—I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79(1), 55–81. doi:10.1016/S0308-521X(03)00053-2
- Manlay, R., Kaire, M., Masse, D., Chotte, J.-L., Ciornei, G., & Floret, C. (2002). Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: I. The plant component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(3), 215–232.
- Masvaya, E. N., Nyamangara, J., Nyawasha, R. W., Zingore, S., Delle, R. J., & Giller, K. (2009). Effect of farmer management strategies on spatial variability of soil fertility and crop nutrient uptake in contrasting agro-ecological zones in Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88(1), 111–120. doi:10.1007/s10705-009-9262-y

- Matthew D. Turner, Pierre Hiernaux, E. S. (2005). The Distribution of Grazing Pressure in Relation to Vegetation Resources in Semi-arid West Africa: The Role of Herding. *Ecosystems*, vol. 8, 668–681.
- Mehdi Saqalli, Charles L. Biielders, B. G. and P. D. (2010). Simulating Rural Environmentally and Socio-Economically Constrained Multi- Activity and Multi-Decision Societies in a Low-Data Context: A Challenge Through Empirical Agent-B. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13, 21.
- Mekasha, A., Gerard, B., Tesfaye, K., Nigatu, L., & Duncan, A. J. (2014). Inter-connection between land use/land cover change and herders'/farmers' livestock feed resource management strategies: a case study from three Ethiopian eco-environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 188, 150–162. doi:10.1016/j.agee.2014.02.022
- Mishra A, Hansen JW, Dingkuhn M, Baron C, Traoré SB, Ndiaye O, W. M. (2008). Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso. *Agric Forest Meteorol*, 148, 1798–1814.
- Naudin, K., Balarabe, O., Giller, K., & Scopel, E. (2010). Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment. *Soil & Tillage Research*, 108, 68–76. doi:10.1016/j.still.2010.03.002
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., ... Ewing, M. (2009). *Changement climatique : Impact sur l'agriculture et coûts de l'adaptation*.
- Neuendorf, D. (2006). Review of MagicDraw UML® 11.5 Professional Edition. *Journal of Object Technology*, 5(7), 115–118.
- Nziguheba, G., Tossah, B.K., Diels, J., Franke, A.C., Aihou, K., Iwuafor, E.N.O., Nwoke, C., Merckx, R. (2009). Assessment of nutrient deficiencies in maize in nutrient omission trials and long-term field experiments in the West African Savanna. *Plant and Soil*, 314, 143–157.
- Ofori, E., Atakora, E. T., & Antwi, B. O. (2013). Relationship between landscape positions and selected soil properties at a Sawah site in Ghana. *African Journal of Agricultural Research*, 8(27), 3646–3652. doi:10.5897/AJAR12.150
- Ouattara, K. ; Ouattara, B. ; Assa, A. ; Sedogo, P. M. (2006). Long-term effect of ploughing, and organic matter input on soil moisture characteristics of a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *SOIL AND TILLAGE RESEARCH*, 8.
- Pierzynski, G. M. (2000). *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Southern Cooperative Series Bulletin No. # 396.
- Powell, J. M. (1987). Nitrogen and phosphorus transfers in a crop-livestock system in West Africa. *Agricultural Systems*, 25, 261–277.
- Powell, J. M., Pearson, R. A., & Hiernaux, P. (2004). Crop – Livestock Interactions in the West African Drylands. *Agronomy Journal*, 483(March 2003), 469–483.

- Powell, J. M., & Turner, M. D. (1996). Nutrient Cycling in Integrated Rangeland / Cropland Systems of the Sahel. *Agricultural Systems*, 52, 28.
- Prudencio, C. Y. (1993). Ring management of soils and crops in the west African semi-arid tropics: The case of the mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 47(3), 237–264. doi:10.1016/0167-8809(93)90125-9
- Ramisch, J. J. (2005). Inequality, agro-pastoral exchanges, and soil fertility gradients in southern Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1-2), 353–372. doi:10.1016/j.agee.2004.02.001
- Ramisch, J. J., Misiko, M. T., Ekise, I. E., & Mukalama, J. B. (2006). Strengthening “ folk ecology ”: community-based learning for integrated soil fertility management , western Kenya. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 4(2), 154–168.
- Reenberg, A., Louring, T., Rasmussen, K. (1998). Field Expansion and Reallocation in the Sahel: Land Use Pattern Dynamics in a Fluctuating Bio-Physical and SocioEconomic Environment. *Global Environment Change*, Vol. 8, 309–327.
- Regis Chikowo, Shamie Zingore, Sieglinde Snapp, A. J. (2014). Farm typologies, soil fertility variability and nutrient management in smallholder farming in Sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100, 1–18.
- Reij, C., Tappan, G. and B. (2005). Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968 — 2002). *Journal of Arid Environments*, 63, 642–659.
- Ridder, Nico De, Henk Breman, H. van K. and T. J. S. (2004). Revisiting a cure against land hunger : soil fertility management and farming systems dynamics in the West African Sahel. *Agricultural Systems*, 80, 109 – 131.
- Ripoche A. , Crétenet M. , Corbeels M. , Affholder F. , Naudin K. , Sissoko F. , Douzet J-M., T. P. (2015). Cotton as a potential entry point for soil fertility maintenance and food crop productivity in savannah agroecosystems – evidence from a long-term experiment in southern Mali. (submitted). *Field Crops Research*.
- Roose, Éric, K. V. et G. C. (1993). Le Zaï: Fonctionnement, limites et amélioration d’une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). In : Spécial érosion : réhabilitation des so. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, pp. 159–173.
- Rovere, R. La, Hiernaux, P., Van Keulen, H., Schiere, J. B., & Szonyi, J. a. (2005). Co-evolutionary scenarios of intensification and privatization of resource use in rural communities of south-western Niger. *Agricultural Systems*, 83(3), 251–276. doi:10.1016/j.agry.2004.04.003
- Rufino, M., Dury, J., Tittonell, P., Van Wijk, M. T., Herrero, M., Zingore, S., ... Giller, K. (2011a). Competing use of organic resources, village-level interactions between farm types and climate variability in a communal area of NE Zimbabwe. *Agricultural Systems*, 104(2), 175–190. doi:10.1016/j.agry.2010.06.001

- Rufino, M., Dury, J., Titttonell, P., Van Wijk, M. T., Herrero, M., Zingore, S., ... Giller, K. (2011b). Competing use of organic resources, village-level interactions between farm types and climate variability in a communal area of NE Zimbabwe. *Agricultural Systems*, 104(2), 175–190. doi:10.1016/j.agsy.2010.06.001
- Rufino, M., Rowe, E. C., Delve, R. J., & Giller, K. (2006). Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(4), 261–282. doi:10.1016/j.agee.2005.08.028
- Sanchez, P. . (2002). Soil Fertility and Hunger in Africa. 2019 - 2020. *SCience*, 259.
- Sanogo, O., De Ridder, N., Van Keulen, H. (2010). Diversité et dynamique des exploitations agricoles mixtes agriculture-élevage au Sud du Mali. *Cahiers Agricultures*, 19(3), 185–193.
- Schlecht, E. (1995). *The influence of different levels of supplementation on feed intake and nutrient retention of zebu cattle in Sahelian agro-pastoral systems. Thesis, University of Hohenheim, Germany.*
- Schlecht, E., Buerkert, A., Tielkes, E., & Bationo, A. (2006). A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Sudano-Sahelian West Africa, 109–136. doi:10.1007/s10705-005-1670-z
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Achard, F., & Turner, M. D. (2004). Livestock related nutrient budgets within village territories in western Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68(3), 199–211. doi:10.1023/B:FRES.0000019453.19364.70
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Kadaouré, I., Hülsebusch, C., & Mahler, F. (2006). A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1-4), 226–242. doi:10.1016/j.agee.2005.09.008
- Schlecht, E. and Buerkert, A. (2004). Organic Inputs and Farmers' Management Strategies in Millet Fields of Western Niger. *Geoderma*, 21, 271–289.
- Scoones, I., Toulmin, C. (1995). Socio-Economic Dimensions of Nutrient Cycling in Agropastoral Systems in Dryland Africa. In *Powell, J., Fernandez-Rivera, S, Williams, T., Renard, C. (Eds.). Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems in Sub-Saharan Africa.* (pp. 353–370).
- Senock, R. S., & Pieper, R. D. (1990). Livestock Production Constraints in the Sahel. *Rangelands*, 12(12), 225 – 229.
- Shatar, T. M., & Mcbratnet, A. B. (2004). Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *The Journal of Agricultural Science*. doi:10.1017/S0021859604004642
- Siband P, Wey J, Oliver R, Letourmy P, M. H. (1999). Analysis of the yield of two groups of tropical maize cultivars. Varietal characteristics, yield potentials, optimum densities. *Agronomie*, 19, 379–394.

- Sterk G.Herrmann L., B. A. (1996). WIND-BLOWN NUTRIENT TRANSPORT AND SOIL PRODUCTIVITY CHANGES IN SOUTHWEST NIGER. *LAND DEGRADATION & DEVELOPMENT*, VOL. 7, 325–335.
- Stoorvogel J.J. , Smaling EoM.A., J. B. H. (1993). Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. *Fertilizer Research*, 227–235.
- Tittonell, P. (2014). Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 53–61. doi:10.1016/j.cosust.2014.08.006
- Tittonell, P., & Giller, K. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, 143, 76–90. doi:10.1016/j.fcr.2012.10.007
- Tittonell, P., Muriuki, a., Shepherd, K. D., Mugendi, D., Kaizzi, C. K., Okeyo, J., ... Vanlauwe, B. (2010). The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa – A typology of smallholder farms. *Agricultural Systems*, 103(2), 83–97. doi:10.1016/j.agsy.2009.10.001
- Tittonell, P., Shepherd, K., Vanlauwe, B., & Giller, K. (2008). Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya—An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(1-3), 137–150. doi:10.1016/j.agee.2007.05.005
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P. A., Shepherd, K. D., & Giller, K. (2005). Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya II . Within-farm variability in resource allocation , nutrient flows and soil fertility status. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 110, 166–184. doi:10.1016/j.agee.2005.04.003
- Traore, B., Corbeels, M., Van Wijk, M. T., Rufino, M., & Giller, K. (2013). Effects of climate variability and climate change on crop production in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 49, 115–125. doi:10.1016/j.eja.2013.04.004
- Turner M. (1995). The sustainability of rangeland to cropland nutrient transfer in semi-arid West Africa: Ecological and social dimensions neglected in the debate. In *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa* (p. 20).
- Valbuena, D. (2014). Identifying determinants, pressures and trade-offs of crop residue use in mixed smallholder farms in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Agric Syst in Press*. doi:10.1016/j.agsy.2014.05.013
- Vall, E., & Diallo, M. A. (2009). Savoirs techniques locaux et pratiques : la conduite des troupeaux aux pâturages (Ouest du Burkina Faso). *Natures Sciences Sociétés*, 17, 122–135.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17. doi:10.1016/j.fcr.2012.09.009

- Vanlauwe, B., Kihara, J., Chivenge, P., Pypers, P., Coe, R., & Six, J. (2010). Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management. *Plant and Soil*, 339(1-2), 35–50. doi:10.1007/s11104-010-0462-7
- Vanlauwe, B., Titttonell, P., & Mukalama, J. (2006). Within-farm soil fertility gradients affect response of maize to fertiliser application in western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76(2-3), 171–182. doi:10.1007/s10705-005-8314-1
- Wezel A., R. T. (2002). Resource conservation strategies in agro-ecosystems of semi-arid West Africa. *Journal of Arid Environments*, 51, 383–400.
- Williams, T. O., Powell, J. M., & Fernández-Rivera, and S. (1993). Manure utilisation, drought cycles and herd dynamics in the Sahel: Implications for cropland productivity. In *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of sub-Saharan Africa*. Addis Ababa, Ethiopia.
- Wopereis, M., Tamélokpo, a., Ezui, K., Gnakpénou, D., Fofana, B., & Breman H., Ketelaars J. J.M.H., T. N. (2006). Mineral fertilizer management of maize on farmer fields differing in organic inputs in the West African savanna. *Field Crops Research*, 96(2-3), 355–362. doi:10.1016/j.fcr.2005.08.004
- Zingore, S., Murwira, H. K., Delve, R. J., & Giller, K. (2007). Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility , crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119, 112–126. doi:10.1016/j.agee.2006.06.019

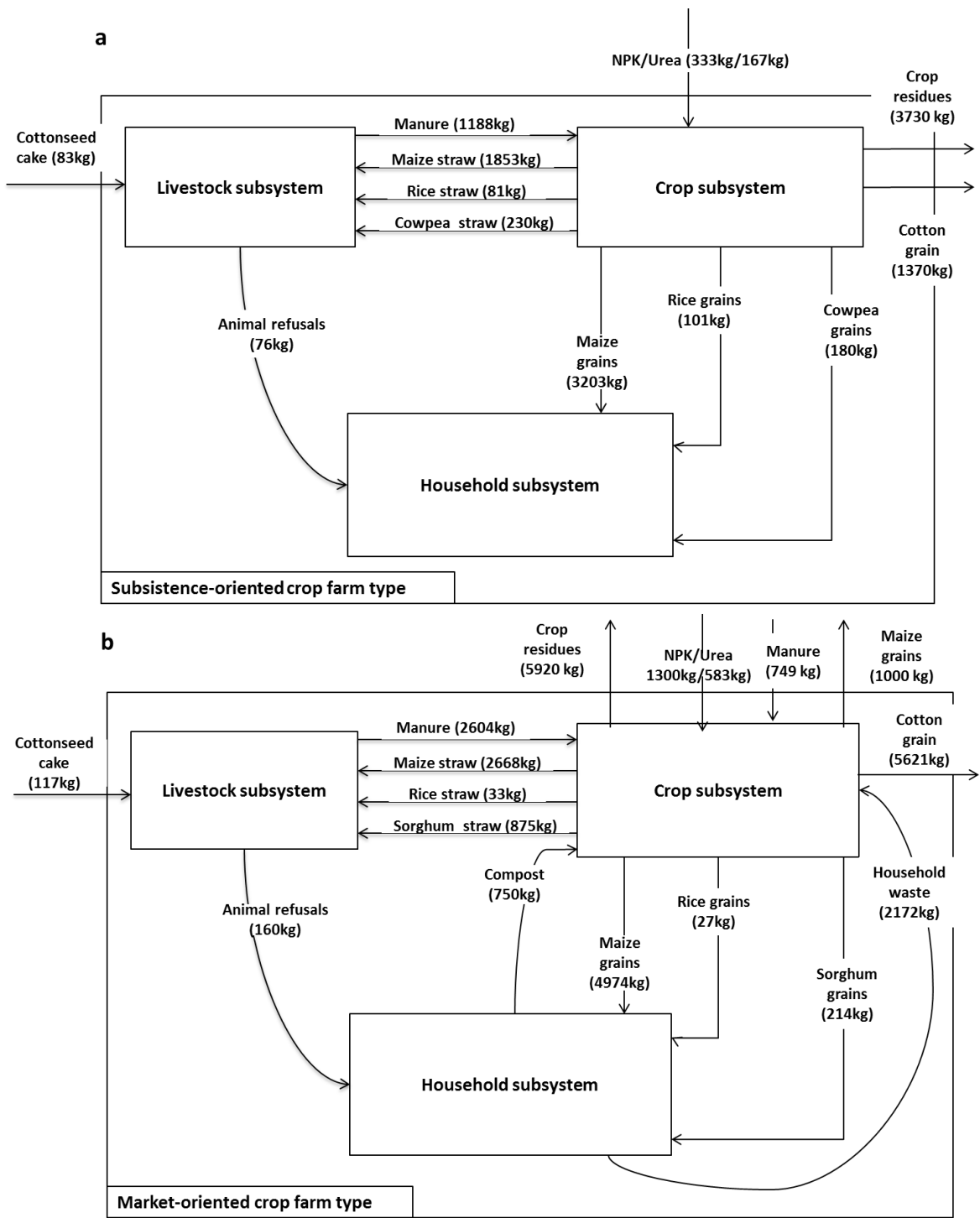
ANNEXES

Table S1. Average nutrient concentrations in crop harvest products, crop residues, organic and inorganic fertilizers, and milk.

	N	P	K	Reference
Cattle manure	1.14 (0.36)	0.73 (0.69)	1.42 (0.93)	Landais and Lhoste (1993); Defoer et al. (1998); Williams et al. (1993)
Cereal mineral fertilizer	15.2 (4.07)	19.4 (7.03)	15.3 (6.47)	Market survey*; Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Compost	0.93 (0.13)	0.34 (0.35)	1.37 (0.20)	Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Cotton cake	7.05	2.86	1.51	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998)
Cotton mineral fertilizer	14	23	14	Defoer et al. (1998)
Cotton grain	1.97 (0.20)	0.63 (0.43)	1.40 (0.29)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Cotton seed	3.52 (0.38)	0.75 (0.38)	1.45 (0.88)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Cotton straw	1.57 (0.41)	0.29 (0.15)	1.50 (0.13)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Cowpea grain	4.17 (0.22)	0.6 (0.24)	1.37 (0.35)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Cowpea haulm	2.17 (0.46)	0.30 (0.14)	1.48 (0.76)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Goat/sheep manure	2.00 (1.02)	0.44 (0.54)	0.68 (0.41)	Landais and Lhoste (1993); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Grass from pastures	1.80 (0.72)	0.46 (0.23)	1.66 (0.91)	Defoer et al. (1998); Manlay et al. (2002)
Groundnut grain	4.81 (1.20)	0.62 (0.44)	0.85 (0.22)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998)
Groundnut haulm	1.73 (0.49)	0.23 (0.20)	1.67 (0.39)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Household waste	1.2 (0.14)	0.2 (0.14)	0.86 (0.34)	Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Maize grain	1.71 (0.45)	0.46 (0.36)	0.4 (0.21)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Maize straw	1.19 (0.12)	0.18 (0.15)	1.81 (0.18)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Milk	0.5	0.1	0.15	Defoer et al. (1998)
Millet grain	2.22 (0.33)	0.50 (0.35)	0.65 (0.27)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Millet straw	1.12 (0.40)	0.22 (0.09)	2.02 (1.31)	Kanté (1998); Defoer et al. (1998)
Mucuna	0.27	1.58	1.76	Boateng (2009)
Onion bulbs	1.83 (0.63)	0.67 (0.43)	1.22 (0.26)	Nijhof (1987)
Rice grain	1.70 (0.30)	0.44 (0.20)	0.61 (0.16)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998)
Rice straw	0.97 (0.13)	0.19 (0.09)	1.99 (0.80)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998)
Sorghum grain	2.37 (0.64)	0.41 (0.12)	0.47 (0.11)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998); Kanté (1998)
Sorghum straw	0.88 (0.41)	0.16 (0.09)	1.40 (0.54)	Nijhof (1987); Defoer et al. (1998) ; Kanté (1998)

*Survey with 5 shopkeepers in the study site to collect nutrient (N-P-K) formula mentioned on fertilizer bags that are sold in the shops

FIGURE S1



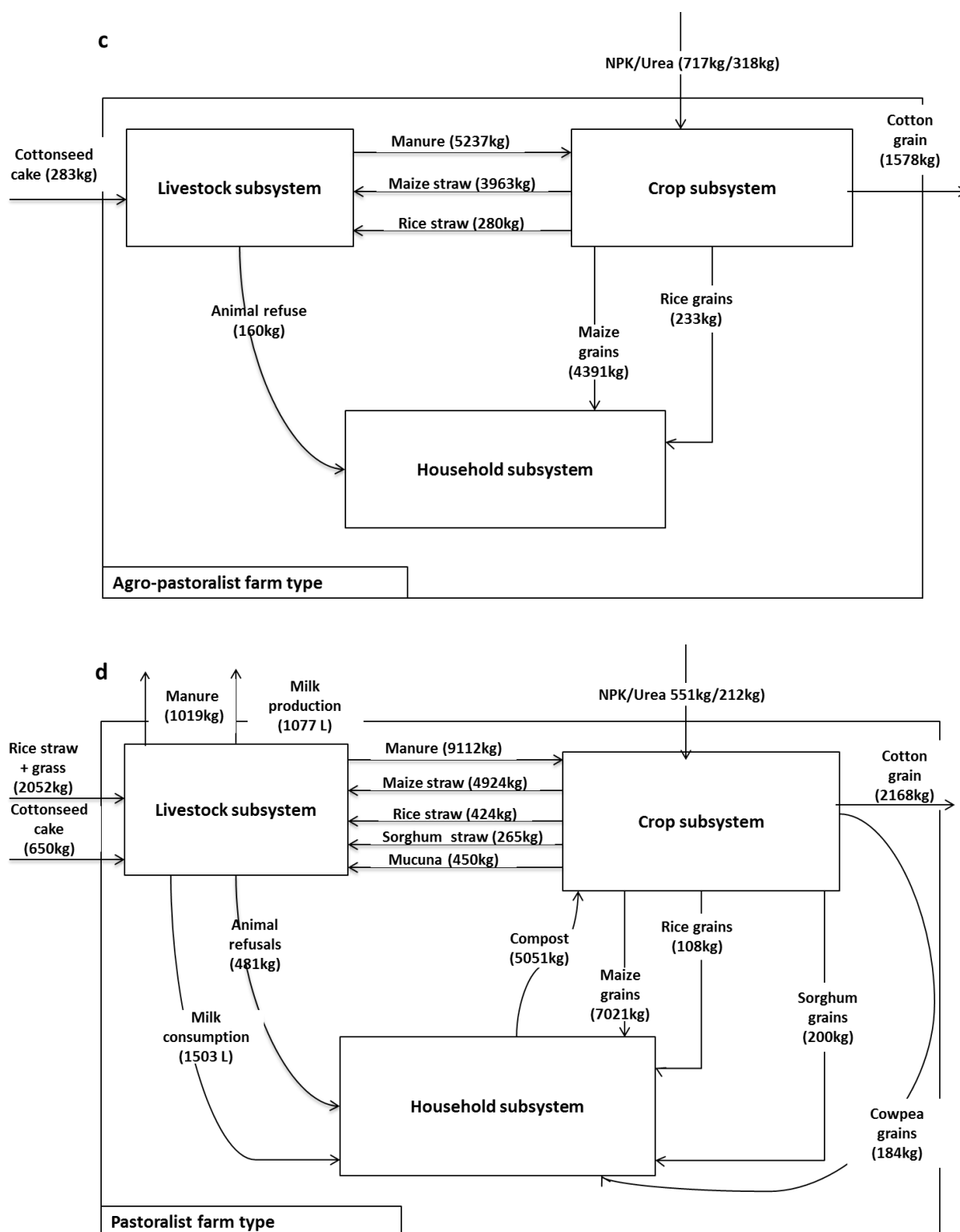


Figure S1. Annual resource flows between subsystems of the farm shown for the four farm types: a) subsistence-oriented crop production farms; b) market-oriented crop production farms; c) agro-pastoralist farms; and d) pastoralist farms - that were identified in the village of Koumbia, Burkina Faso

Figure A1. Annual resource flows between subsystems of the farm shown for the four farm types that were identified in the village of Koumbia, Burkina Faso.

Table A2 : Soil fertility indicators per farm types and sites

Village and farm types		SOC	available P	K
Yilou				
	T1	0.99±0.6	7.81±10.5	0.77±0.8
	T2	1.04±0.6	13.26±20.7	0.93±0.9
	T3	1.05±0.6	6.98±9.0	1.0±0.8
	T4	0.77±0.25	2.37±2.6	0.42±0.2
Koumbia				
	T1	0.69±0.2	2.37±1.3	0.25±0.2
	T2	0.93±0.3	1.77±1.1	0.28±0.1
	T3	0.49±0.2	2.21±1.7	0.16±0.1
	T4	0.56±0.4	4.0±3.0	0.31±0.2

Table A3 : Total nitrogen, phosphorus and potassium input (kg ha⁻¹) per farm and field type

Village	Close fields				Mid-distance fields				Remote fields			
	T 1	T 2	T 3	T 4	T1	T2	T3	T 4	T 1	T2	T 3	T4
Yilou												
N	10.2 ±1.8	9.0 ±5.5	8.8 ±9.9	32.0 ±15.0	5.7 ±3.2	7.9 ±1.8	5.6 ±4.8	11.4 ±10.4	4.8 ±1.8	3.3 ±3.6	12.1 ±15.3	5.5 ±4.3
P	13.3 ±4.7	6.9 ±5.1	6.2 ±8.2	15.5 ±13	7.9 ±4.0	13.2 ±9.1	5.53 ±5.7	7.3 ±6.7	6.8 ±3.5	3.5 ±4.2	14.5 ±19.4	5.6 ±4.0
K	10.6 ±1.3	11.2 ±6.1	11.5 ±12.5	32.8 ±20.6	5.8 ±4.6	9.8 ±3.4	6.5 ±5.6	14.1 ±12.9	4.8 ±1.8	3.7 ±3.9	12.5 ±15.4	5.2 ±3.9
Koumbia												
N	37.9 ±31.4	8.1 ±7.1	42.9 ±38.5	25.5 ±10.1	46.4 ±9.3	64.2 ±5.8	35.4 ±36.5	32.1 ±26.6	31.7 ±38.3	36.2 ±19.2	14.9 ±23.0	16.1 ±19.1
P	24.3 ±22.5	9.6 ±10.1	26.3 ±23.7	19.9 ±7.8	33.0 ±5.0	50.4 ±4.4	24.7 ±23.2	24.1 ±25.1	20.9 ±25.6	24.0 ±11.6	11.8 ±14.2	11.8 ±16.2
K	16.8 ±17.8	9.0 ±7.8	30.0 ±31.7	12.1 ±4.8	21.5 ±3.4	36.6 ±11.0	27.9 ±30.3	18.2 ±19.0	14.8 ±18.3	21.2 ±13.4	13.3 ±20.0	8.1 ±11.4

Table A4 : Soil fertility indicators per farm and field type at Yilou

Farm and field types	SOC (%)	Total N(‰)	P _{available} (mg.kg ⁻¹)	Exchangeable bases				pH _{water}
				Ca	Mg	K	Na	
Subsistence-oriented								
Close	1.09 ±0.7	0.97 ±0.8	9.02 ±12.3	6.88 ±5.0	1.73 ±1.2	0.87 ±0.9	0.05 ±0.02	6.73 ±0.9
Mid-distance	0.80 ±0.1	0.62 ±0.1	2.89 ±1.5	4.45 ±1.0	1.46 ±0.2	0.42 ±0.1	0.05 ±0.02	6.45 ±0.9
Remote	0.87 ±0.5	0.89 ±0.6	10.4 ±12.2	8.53 ±7.3	1.86 ±1.1	0.87 ±1.0	0.09 ±0.1	6.80 ±1.5
Agro-pastoralists								
Close	1.26 ±0.7	1.23 ±0.8	16.71 ±24.5	6.80 ±3.9	2.08 ±1.0	1.12 ±1.0	0.06 ±0.04	6.73 ±0.9
Mid-distance	0.98 ±0.6	0.99 ±0.9	16.23 ±23.3	4.14 ±2.5	1.74 ±1.1	1.07 ±1.3	0.05 ±0.01	5.67 ±1.0
Remote	0.57 ±0.1	0.43 ±0.1	2.22 ±0.6	2.87 ±0.8	1.14 ±0.7	0.35 ±1.1	0.05 ±0.02	5.66 ±0.2
Market-oriented								
Close	1.21 ±0.5	1.16 ±0.6	8.9 ±10.4	9.72 ±7.0	2.03 ±0.9	1.34 ±1.0	0.07 ±0.06	7.17 ±0.8
Mid-distance	1.15 ±0.7	1.08 ±0.9	8.15 ±10.6	8.18 ±3.9	2.10 ±1.0	1.04 ±0.8	0.06 ±0.03	7.20 ±0.9
Remote	0.69 ±0.04	0.54 ±0.1	2.49 ±0.9	3.28 ±1.5	1.21 ±0.2	0.42 ±0.16	0.07 ±0.04	6.28 ±0.8
Off-farm-oriented								
Close	0.62 ±0.2	0.47 ±0.1	1.5 ±0.2	3.4 ±0.5	1.3 ±0.1	0.3 ±0.1	0.03 ±0.01	5.59 ±0.1
Mid-distance	0.76 ±0.1	0.63 ±0.03	2.1 ±1.6	3.97 ±1.4	1.46 ±0.2	0.37 ±0.14	0.08 ±0.04	5.50 ±0.9
Remote*	1.26	1.23	8.31	6.06	1.59	0.86	0.08	6.73
Significance (P values)								
Farm type	0.942	0.957	0.671	0.395	0.901	0.738	0.771	0.034
Field type	0.625	0.726	0.834	0.536	0.671	0.620	0.482	0.501
Interaction	0.646	0.597	0.845	0.450	0.817	0.731	0.541	0.301

*Only one remote field was sampled for this farm type

Table A5: Soil fertility indicators per farm and field type at Koumbia

Farm and field types	SOC (%)	Total N(‰)	P _{available} (mg.kg ⁻¹)	Exchangeable bases				pH _{water}
				Ca	Mg	K	Na	
Subsistence-oriented								
Close	0.58 ±0.4	0.42 ±0.2	2.98 ±1.2	1.96 ±2.9	0.75 ±1.0	0.28 ±0.2	0.03 ±0.02	5.74 ±0.7
Mid-distance	0.59 ±0.1	0.42 ±0.1	1.91 ±1.1	2.34 ±1.1	0.77 ±0.4	0.17 ±0.1	0.02 ±0.01	5.91 ±0.3
Remote	0.87 ±0.4	0.63 ±0.4	2.38 ±1.5	5.05 ±6.3	1.82 ±2.6	0.29 ±0.2	0.09 ±0.1	5.78 ±0.8
Agro-pastoralists								
Close	0.74 ±0.5	0.50 ±0.4	2.82 ±1.3	5.35 ±4.7	0.83 ±0.7	0.28 ±0.1	0.02 ±0.0	7.17 ±0.9
Mid-distance	0.83 ±0.5	0.58 ±0.3	1.69 ±0.4	3.04 ±1.9	1.18 ±0.8	0.43 ±0.3	0.03 ±0.01	5.97 ±0.3
Remote	0.64 ±0.3	0.49 ±0.2	4.03 ±3.1	2.45 ±1.1	0.80 ±0.3	0.31 ±0.1	0.03 ±0.01	6.10 ±0.5
Market-oriented								
Close	0.76 ±0.5	0.57 ±0.4	3.86 ±1.8	3.47 ±1.3	1.06 ±0.6	0.31 ±0.2	0.07 ±0.1	6.33 ±0.9
Mid-distance	0.92 ±0.3	0.66 ±0.3	1.29 ±0.2	4.30 ±3.1	1.19 ±0.7	0.26 ±0.1	0.05 ±0.02	5.81 ±0.5
Remote	0.61 ±0.3	0.41 ±0.3	1.93 ±0.6	2.20 ±1.2	0.67 ±0.3	0.23 ±0.1	0.03 ±0.01	6.15 ±0.1
Pastoralists								
Close	0.53 ±0.3	0.38 ±0.2	4.05 ±3.2	2.46 ±1.8	0.70 ±0.5	0.23 ±0.1	0.03 ±0.01	6.08 ±0.4
Mid-distance	1.02 ±0.2	0.70 ±0.1	1.42 ±0.3	3.79 ±0.6	1.54 ±0.2	0.55 ±0.2	0.03 ±0.01	5.98 ±0.3
Remote	0.27 ±0.04	0.18 ±0.01	1.93 ±0.6	1.00 ±0.2	0.35 ±0.01	0.12 ±0.02	0.03 ±0.01	5.94 ±0.2
Significance								
Farm type	0.671	0.694	0.947	0.673	0.897	0.425	0.441	0.094
Field type	0.134	0.212	0.076	0.656	0.493	0.094	0.654	0.094
Interaction	0.228	0.312	0.675	0.162	0.221	0.022	0.416	0.260

Table A6 : Soil fertility indicators per farm and field texture

Farm and field types	SOC (%)	Total N(‰)	P _{available} (mg.kg ⁻¹)	Exchangeable bases				pH _{water}
				Ca	Mg	K	Na	
Yilou								
SC	0.97 ±0.5	0.84 ±0.5	6.50 ±9.7	6.14 ±3.7	1.63 ±0.7	0.72 ±0.6	0.06 ±0.3	6.62 ±1.0
SG	1.15 ±0.8	1.09 ±0.8	14.10±21.0	7.64 ±7.1	1.98 ±1.2	1.17 ±1.2	0.06 ±0.06	6.57 ±0.9
SL	0.96 ±0.6	0.93 ±0.7	7.99 ±13.0	5.58 ±4.3	1.77 ±1.0	0.92 ±0.8	0.07 ±0.04	6.32 ±0.9
Koumbia								
FS	0.89 ±0.5	0.68 ±0.4	2.09 ±1.3	4.67 ±5.0	1.71 ±2.0	0.26 ±0.2	0.07 ±0.1	5.63 ±0.5
MS	0.79 ±0.3	0.55 ±0.2	2.04 ±1.9	3.09 ±1.8	0.99 ±0.6	0.28 ±0.1	0.03 ±0.01	5.94 ±0.6
US	0.57 ±0.3	0.41 ±0.3	3.55 ±2.4	2.63 ±2.0	0.75 ±0.5	0.29 ±0.2	0.03 ±0.04	6.24 ±0.5

SC: sand and clay; SG: sand and gravel; SL: sand and silt

FS: foot slope; MS mid slope; US: up slope